



**HAL**  
open science

# Combinaison d'informations ponctuelles et volumiques pour le diagnostic d'ouvrages en terre soumis à des risques hydrauliques

Théo Dezert

## ► To cite this version:

Théo Dezert. Combinaison d'informations ponctuelles et volumiques pour le diagnostic d'ouvrages en terre soumis à des risques hydrauliques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Nantes - Faculté des Sciences et Techniques, 2019. Français. NNT: . tel-02459100

**HAL Id: tel-02459100**

**<https://theses.hal.science/tel-02459100v1>**

Submitted on 29 Jan 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE NANTES  
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 600  
*Ecole doctorale Ecologie, Géosciences, Agronomie et Alimentation*  
Spécialité : « *Sciences de la Terre et de l'Environnement* »

Par

**Théo DEZERT**

## **Combinaison d'informations ponctuelles et volumiques pour le diagnostic d'ouvrages en terre soumis à des risques hydrauliques**

Thèse présentée et soutenue à Bouguenais, le 02/12/2019  
Unité de recherche : Laboratoire GeoEND, Département GERS, IFSTTAR, Nantes  
Unité GER, Laboratoire Régional de Blois, CEREMA

### **Rapporteurs avant soutenance :**

Pierre BREUL  
Isabelle COUSIN

Professeur des Universités, Polytech Clermont-Ferrand  
Directeur de Recherche, INRA

### **Composition du Jury :**

Présidente : Agnès BALTZER  
Examineurs : Cyrille FAUCHARD  
Martin SANCHEZ ANGULO  
Colette SIRIEIX  
Marc VUILLET

Professeur des Universités, Université de Nantes  
Directeur de Recherche, CEREMA  
Maître de Conférences, Université de Nantes  
Professeur des Universités, Université de Bordeaux  
Chargé de Recherche, École des Ingénieurs de la Ville de Paris

Dir. de thèse : Philippe CÔTE

Directeur de Recherche, IFSTTAR

### **Invité(s) :**

Co-encadrant : Yannick FARGIER  
Co-encadrant : Sérgio PALMA LOPES

Chargé de recherche, IFSTTAR - CEREMA  
Ingénieur des Travaux Publics de l'État, IFSTTAR

Rémy TOURMENT

Ingénieur de Recherche, IRSTEA

---

# Remerciements

Voici la page du manuscrit lue en premier par le lecteur et pourtant celle qui arrive en dernier par son écriture. Ces quelques lignes viennent donc placer le point final à trois années de recherches sur un sujet que je n'aurais pas soupçonné investiguer il y a de cela quelques temps. Quel luxe de pouvoir creuser un sujet spécifique durant trois années complètes ainsi que d'apprendre, d'échanger et de communiquer dessus ! Les années passent malheureusement bien vite et l'on souhaiterait avoir l'opportunité de pousser ses idées plus loin et avoir le temps de proposer un plus grand nombre d'études. Dans l'espoir que les idées semées ci et là dans cet ouvrage puissent être reprises et consolidées dans un futur : je vous souhaite une bonne lecture et vous remercie !

Si je puis affirmer une chose, c'est que ces années de thèse m'ont apporté beaucoup à la fois scientifiquement qu'humainement et je dois assurément cela à mes deux encadrants Sérgio et Yannick. Merci d'avoir su me laisser la liberté et l'autonomie dont j'avais besoin pour avancer dans mes travaux ainsi que d'avoir répondu présents dès que j'en émettais le besoin. J'ai trouvé grâce à vous le cadre idéal pour travailler tout en prenant plaisir à cela et s'il y a bien une chose qui importe, c'est celle-là : un grand merci sincère. Je tiens également à remercier mon directeur de thèse, Philippe, d'avoir accepté de diriger ces travaux ainsi que d'avoir su en particulier porter un regard avisé sur les méthodes d'investigation géophysiques décrites dans notre premier article.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du Jury d'avoir accepté d'évaluer ces travaux de thèse. Merci pour vos suggestions de corrections, de pistes de réflexion et pour les discussions scientifiques que nous avons pu avoir. Merci à Roger Guérin, Joëlle Riss et Rémy Tourment pour les riches échanges scientifiques lors des réunions de comité de suivi de thèse.

Merci aux équipes m'ayant aidées sur l'ensemble des manips, à la fois sur site et en laboratoire. Je pense en particulier à Xavier, Gautier, Lamine, Lucile, Vincent, Clément ainsi qu'aux équipes de sondeurs du Cerema St-Brieuc, d'Angers et de Blois.

Merci aux collègues du LRB et à l'association de La Pause Café de m'avoir accueilli chaleureusement au début de ma thèse, en particulier à Edouard, Yasmina, Ludovic, Patrice, Philippe, Bastien et Sophie.

Merci à tous les collègues de l'Ifsttar Nantes pour l'ensemble des moments partagés durant ces trois années. Merci à Nathalie d'avoir géré l'ensemble des missions et merci à Jean-Luc pour le prêt de matériel vidéo. Merci aux collègues de GMG et spécifiquement à Andry, Jean-Pierre et Thierry. Une pensée toute particulière va aux partenaires de Molky qui ont su perdre avec le sourire contre l'équipe du bureau B119 ainsi qu'à tous les agents non permanents : doctorants, stagiaires et post-doc. Un remerciement spécial à Romain sans qui cette expérience de thèse n'aurait définitivement pas eu la même saveur, merci pour toutes nos discussions et bons moments partagés, presque colloqs pendant 3 ans, ce n'est pas rien ! Merci également à Nicolas d'avoir partagé notre bureau et nos moments de convivialité. Merci à Quiterie de m'avoir accordé sa confiance pour encadrer son stage de fin d'études.

Merci aux personnes hors Cerema et Ifsttar qui ont montré de l'intérêt pour mes travaux. Je pense notamment à Jean-Robert Courivaud, Angélie Portal et Rémi Clément. Amine, merci également à toi pour la confiance que tu m'as accordée. Je tiens aussi à remercier Clara Jodry d'avoir accepté de présenter mes travaux en Suède alors que j'étais retenu en France. Tu m'as vraiment rendu un fier service.

Je tiens aussi à remercier mes parents et en particulier mon père qui a sûrement fait germer en moi l'intérêt pour la science depuis mon plus jeune âge et l'envie de poursuivre de longues études. Merci également pour ton initiation musicale sans laquelle je ne serai assurément pas la même personne. Merci à mes grands-parents pour nos nombreuses et enrichissantes discussions hebdomadaires ainsi qu'à mes oncles et tantes pour leur soutien dans les moments difficiles.

Muchas gracias a mis suegros los cuales me mandaron mäs besos y amor que necesario y que me aceptaron como su hijo.

Et évidemment, je remercie Luisa qui croit en moi plus que de raison et que je ne pourrai jamais remercier assez de toujours répondre présente à mes côtés, à la fois dans le haut et dans le creux de la vague. S'il n'y avait qu'une personne à remercier, ce serait toi. Enfin, je n'oublie pas Charlie qui a accepté mes déplacements sans accumuler de rancune et en m'accordant toujours l'accueil le plus chaleureux et sincère qu'il est possible de recevoir !

---

# Résumé

En France, les digues de protection fluviales s'étendent sur plus de 8 600 km. Ces ouvrages sont très hétérogènes, de par leur mode de construction et leur historique (ruptures et réparations, rehausses...). Les ruptures d'ouvrages sont susceptibles de mener à des conséquences désastreuses telles que des pertes humaines, économiques, environnementales et patrimoniales. Afin de prévenir les risques de rupture, une bonne gestion des digues de protection est requise. Celle-ci doit comprendre des surveillances, diagnostics et entretiens réguliers. Le diagnostic débute par une reconnaissance visuelle de l'objet d'étude ainsi que par des recherches historiques et bibliographiques, il se poursuit ensuite avec des surveillances régulières. Des méthodologies reconnues pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques s'appuyant sur des méthodes de reconnaissance géotechniques et géophysiques peuvent aussi être employées.

Ces deux ensembles de méthodes de reconnaissance sont complémentaires mais rarement considérés conjointement. Au mieux, les résultats de chacune des méthodes sont simplement superposés. Les méthodes géophysiques apportent une information physique sur de larges volumes de sols mais avec de potentielles incertitudes significatives. Il s'agit principalement de méthodes à grand rendement et non intrusives. Les incertitudes associées aux résultats sont notamment dues aux aspects intégrant et indirect des méthodes mais également à la résolution de problèmes inverses intrinsèquement mal posés. Enfin, la ou les grandeurs physiques mesurées par les méthodes géophysiques ne rentrent pas directement dans les modèles de justification des ouvrages vis-à-vis des modes de rupture. Concernant les méthodes de reconnaissance géotechnique, elles sont intrusives et apportent une information plus ponctuelle spatialement, mais également plus précise et plus adaptée à l'analyse des modes de rupture. Etre capable de combiner les données acquises par les méthodes géophysiques et géotechniques, en tenant compte de leurs imperfections et distributions spatiales associées, est un enjeu essentiel pour l'évaluation des digues de protection.

Il s'agit donc d'un contexte de risque naturel associé à notre capacité à caractériser une digue de protection fluviale à partir d'au moins deux méthodes de reconnaissance, respectivement géotechnique et géophysique. Nous proposons, dans ce travail de thèse, l'utilisation de modèles de fusion d'informations pour la combinaison de données issues de ces deux familles de méthodes de reconnaissance. Nous retenons la théorie des masses de croyance, dans l'objectif de proposer une caractérisation de l'ouvrage plus proche de la réalité.

---

Ce travail présente une méthodologie de combinaisons d'informations, issues de méthodes de reconnaissance géotechniques et géophysiques, tenant compte des particularités de chaque méthode (niveau d'imperfection associé aux données, répartition spatiale de l'information). Cette nouvelle méthodologie améliore la caractérisation des ensembles lithologiques au sein des digues et renseigne sur le niveau de conflit entre les sources d'information tout en proposant un indice de confiance associé aux résultats. De tels résultats pourraient avoir un impact positif sur l'optimisation des campagnes de reconnaissance à réaliser (nombre et positions des essais à réaliser selon la localisation des zones de faible confiance ou de conflit).

La méthodologie développée est détaillée au long de ce manuscrit et mise en oeuvre à travers des exemples de sections de sous-sols caractérisées à travers de données synthétiques et expérimentales ainsi qu'issues d'un véritable ouvrage hydraulique en terre.

---

# Abstract

The river protection levees represent more than 8 600 km of works on the national territory and are very heterogeneous, because of a construction made from materials encountered nearby as well as their history (breaks and repairs, extensions...). In order to prevent the risk of structural failure, which can lead to catastrophic consequences such as loss of lives and economic disasters, protection levees require special supervision. This surveillance first requires visual recognition, in addition to historical and bibliographical research. Recognized methodologies for levee assessment also include geophysical and geotechnical survey methods.

These two families of methods are complementary but rarely considered jointly. At best, the results obtained by each method are simply overlaid. Geophysical methods are non-intrusive and provide physical information on large volumes of soils with high output but with significant potential uncertainties. These uncertainties are due in particular to the integrating and indirect aspects of the methods as well as to the resolution of the intrinsically ill-posed inverse problems. Moreover, the measured physical quantity does not fit into the models of justification of the structures with respect to the modes of rupture. Geotechnical reconnaissance methods, on the other hand, are intrusive and provide more intermittent information but also more accurate and more adapted to the analysis of failure modes. An important issue for the evaluation of fluvial protection levees is to be able to combine acquired geophysical and geotechnical data, while taking into consideration their respective imperfections and spatial distributions.

This particular context of natural risk is therefore associated with our ability to characterize an earthen hydraulic structure from at least two survey methods : a geophysical and a geotechnical one. In this thesis work, we propose the use of information fusion models, and we use the theory of belief masses to combine the data from these two families of recognition methods to present a characterization of the levee.

We propose here a methodology of combinations of information, resulting from geophysical and geotechnical survey methods, taking into account the specificities of each method concerning the associated data imperfection as well as the spatial distribution of the information. This new methodology makes it possible to improve the characterization of geological sets within hydraulic structures and indicate the conflict level between information sources while associating a confidence index with

---

the proposed results. These results could have an impact on the optimization of the following survey campaigns (number and positions of the tests to be carried out, according to the location of low confidence or conflictual areas).

The methodology developed is detailed throughout this manuscript and implemented through examples of subsoil sections characterized by synthetic and experimental data as well as by a real earthen hydraulic structure.

---

# Notations

La liste ci-dessous regroupe les notations, symboles et acronymes pouvant être rencontrés dans ce manuscrit de thèse.

## Notations et symboles

$\emptyset$	: Conflit entre les sources d'information	
$2^\Theta$	: Ensemble des sous-ensembles de $\Theta$ (Powerset)	
$\cap$	: Intersection d'ensembles	
$\cup$	: Union d'ensembles	
$\alpha$	: Facteur rhéologique	
$Bel(\cdot)$	: Fonction de crédibilité	
$C_v$	: Coefficient de variation calculé entre deux sondages, à profondeur fixée	
$D_{Wass}$	: Distance de Wasserstein entre intervalles de résistivités	
$E_M$	: Module pressiométrique	[MPa]
$f_s$	: Frottement latéral	[MPa]
$k$	: Coefficient de décroissance latérale des masses de croyance associées à l'information géotechnique	[ $m^{-1}$ ]
$K$	: Facteur géométrique	[ $m$ ]
$m(\cdot)$	: Fonction de masse de croyance	
$M(0)$	: Distribution de masses de croyance affectée aux hypothèses du cadre de discernement au niveau du sondage, pour $x = 0$	
$M(x)$	: Distribution de masses de croyance affectée aux hypothèses du cadre de discernement pour une position $x$ par rapport au sondage géotechnique de référence	
$N$	: Nécessité	
$p$	: Profondeur du matériau au sein d'une carotte	[ $m$ ]
$P(\cdot)$	: Fonction de probabilité	
$P_f$	: Pression de fluage	[MPa]
$P_{LM}$	: Pression limite	[MPa]

---

$\pi$ : Distribution de possibilité	
$\Pi$ : Possibilité	
$Pl(\cdot)$ : Fonction de plausibilité	
$q_c$ : Résistance de pointe	[MPa]
$R_0$ : Résistance de transfert simulée sur un milieu homogène de résistivité $1 \Omega.m$	[ $\Omega$ ]
$R_f$ : Ratio de friction	[%]
$\rho$ : Résistivité électrique	[ $\Omega.m$ ]
$\rho_a$ : Résistivité apparente	[ $\Omega.m$ ]
$S_j$ : Source d'information $j$	
$S_u$ : Résistance au cisaillement non drainée	[kPa]
$\sigma$ : Conductivité électrique apparente	[ $S.m^{-1}$ ]
$\Theta$ : Cadre de discernement	
$\theta_n$ : Hypothèse $n$ constitutive de $\Theta$	
$u$ : Pression interstitielle	[kPa]
$v$ : Vitesse sismique	[ $m.s^{-1}$ ]

### Acronymes

CPT : Cone Penetrometer Test
DS : Dempster-Shafer
EMI : Electromagnetic Induction
ERT : Electrical Resistivity Tomography
FOD : Frame of Discernment
GPR : Ground Penetrating Radar
HET : Hole Erosion Test
IP : Induced Polarization
IR : Infrared
JET : Jet Erosion Test
MASW : Multi Channel Analysis of Surface Waves
MoJET : Mobile Jet Erosion Test
NMR : Nuclear Magnetic Resonance
OHT : Ouvrage Hydraulique en Terre
PCR6 : Proportional Conflict Redistribution rule n° 6
RMT : Radio Magnéto Tellurique

ROC : Receiver Operating Characteristic

SBT : Soil Behavior Type

SP : Self Potential

TBM : Transferable Belief Model

TDR : Time Domain Reflectometry

---

# Publications scientifiques

Les travaux réalisés durant ce travail de thèse, présentés dans le cadre de colloques ou acceptés dans des revues scientifiques, sont regroupés ci-dessous.

## Travaux présentés dans le cadre de colloques internationaux et francophones

Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Côte, P., & Jodry, C. (2017, September). A New Database Structure Guiding the Combination of Geophysical and Geotechnical Methods for Levee Investigation. In 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.

Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y. & Côte, P. (2017, November). Combinaison de méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic d'ouvrages hydrauliques. In 14th AGAP Qualité Journées Scientifiques.

Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., & Côte, P. (2018, September). Geophysical and Geotechnical Data Fusion for Levee Assessment-Interface Detection with Biased Geophysical Data. In 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.

Dezert, T., Fargier, Y., Palma Lopes, S., & Côte, P. (2018, September). Application of Belief Functions to Levee Assessment. In International Conference on Belief Functions (pp. 73-76). Springer, Cham.

Dezert, T., Fargier, Y., Palma Lopes, S., & Côte, P. (2018, November). Fusion de données géophysiques et géotechniques pour l'utilisation des fonctions de croyance. In GEOFCAN 2018.

Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Forquenot de la Fortelle, Q., Côte, P., & Tourment, R. (2019, March). Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues. In Dignes 2019.

Dezert, T., Fargier, Y., Palma Lopes, S., & Côte, P. (2019, September) Levee Characterization by Means of Data Fusion of In-Situ Geophysical and Geotechnical Information. In 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.

**Articles publiés dans des revues scientifiques internationales de rang A**

Dezert, T., Fargier, Y., Palma Lopes, S., & Côte, P. (2019) Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : a review. In *Engineering Geology*, 105206.

Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., & Côte, P. (2019) Combination of geophysical and geotechnical data using belief functions : assessment with numerical and laboratory data. In *Journal of Applied Geophysics*, 170 :103824.

**Article soumis dans des revues scientifiques internationales de rang A**

Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Saussaye, L., & Côte, P. Data Fusion of In-Situ Geophysical and Geotechnical Information for Levee Characterization. In *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

---

# Table des matières

<b>Remerciements</b> . . . . .	i
<b>Résumé</b> . . . . .	iii
<b>Abstract</b> . . . . .	v
<b>Notations</b> . . . . .	vii
<b>Publications scientifiques</b> . . . . .	x
<b>Table des matières</b> . . . . .	xii
<b>Table des figures</b> . . . . .	.xviii
<b>Liste des tableaux</b> . . . . .	xxvii
<b>Introduction</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>I Les digues et leurs propriétés, méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques, modèles de combinaison de l'information</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>A Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : a Review</b> . . . . .	<b>9</b>
1 Introduction . . . . .	9
2 Fluvial levees and related pathologies . . . . .	10
2.1 Fluvial levees . . . . .	10
2.2 Failure mechanisms and associated physical properties and characteristics . . . . .	11
3 Geophysical investigation methods . . . . .	15
3.1 DC-Electrical Resistivity methods . . . . .	16
3.2 Self potential method . . . . .	19
3.3 Induced polarization method . . . . .	20
3.4 Low-frequency near-field electromagnetic induction method (Slingram) . . . . .	22
3.5 Ground penetrating radar method . . . . .	24
3.6 Nuclear magnetic resonance (NMR) method . . . . .	27
3.7 Seismic refraction tomography method . . . . .	28
3.8 Multi-channel analysis of surface waves (MASW) method . . . . .	30
3.9 Acoustic method . . . . .	32
3.10 Micro-gravimetry method . . . . .	32
3.11 Temperature based method . . . . .	34
4 Geotechnical investigation methods . . . . .	35
4.1 Laboratory testing on soil samples . . . . .	35

	4.2	Drilling parameters recordings . . . . .	36
	4.3	Cone penetrometer test . . . . .	38
	4.4	Field vane shear test . . . . .	40
	4.5	Pressuremeter test . . . . .	41
	4.6	Hydraulic permeability tests . . . . .	43
5		Discussion . . . . .	45
6		Conclusion . . . . .	49
<b>B</b>		<b>Modèles de combinaison et de fusion de l'information . . . . .</b>	<b>50</b>
1		Introduction . . . . .	50
2		Qualité de l'information et formes d'imperfection . . . . .	52
	2.1	Incomplétude . . . . .	52
	2.2	Imprécision . . . . .	53
	2.3	Incertitude . . . . .	53
	2.4	Inconsistance . . . . .	53
3		Amélioration de la donnée en entrée . . . . .	53
	3.1	Méthode des moindres carrés . . . . .	54
	3.2	Méthode du maximum de vraisemblance et du maximum a posteriori . . . . .	55
	3.3	Méthode du filtre de Kalman . . . . .	56
4		Modèles de combinaison . . . . .	58
	4.1	Réseaux de neurones artificiels . . . . .	59
	4.2	Théorie des probabilités « fréquentiste » . . . . .	61
	4.3	Théorie des probabilités subjectives . . . . .	62
	4.4	Théorie des sous-ensembles flous . . . . .	64
	4.5	Théorie des possibilités . . . . .	66
	4.6	Théorie des masses de croyance . . . . .	67
5		Ajustement du résultat en sortie . . . . .	69
6		Conclusion . . . . .	70
<b>II</b>		<b>Méthodologie de fusion d'informations géophysiques et géotechniques développée dans le cadre de la théorie des masses de croyance</b>	<b>73</b>
<b>A</b>		<b>Théorie des masses de croyance . . . . .</b>	<b>77</b>
1		Introduction . . . . .	77
2		Représentation de l'information . . . . .	77
	2.1	Cas particuliers de fonctions de masse de croyance . . . . .	77
	2.2	Représentation de l'information : différence avec le cadre probabiliste . . . . .	78
3		Règles de combinaison . . . . .	79
	3.1	Hypothèse d'un monde fermé : règle de Dempster-Shafer . . . . .	79
	3.2	Hypothèse d'un monde ouvert de Smets . . . . .	80
	3.3	Règle de PCR6, Proportional Conflict Redistribution rule no 6 . . . . .	81
4		Exemple illustratif de l'application des règles de combinaison . . . . .	82
5		Mise en difficulté de la règle de combinaison de Dempster-Shafer . . . . .	84

6	Utilisation dans le domaine des géosciences . . . . .	85
6.1	Risques de glissements de terrain . . . . .	85
6.2	Potentiel et qualité des eaux souterraines . . . . .	86
7	Conclusion . . . . .	87
<b>B</b>	<b>Méthodologie de fusion développée . . . . .</b>	<b>89</b>
1	Introduction . . . . .	89
2	Modèle considéré et cadre de discernement . . . . .	90
3	Construction de masses de croyance à partir de données géo-physiques . . . . .	91
3.1	Construction d'un modèle géoélectrique et simulation d'acquisitions . . . . .	92
3.2	Reconstruction de la subsection de résistivités vraies . . . . .	93
3.3	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	96
3.4	Attribution des masses de croyance . . . . .	97
3.5	Section issue de la construction de masses de croyance géophysiques . . . . .	100
4	Construction de masses de croyance à partir de données géotechniques . . . . .	101
4.1	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	101
4.2	Simulation d'acquisition . . . . .	102
4.3	Attribution de masses de croyance dans les points de sondage et extension de l'information . . . . .	103
4.4	Combinaison d'information entre deux sondages . . . . .	105
4.5	Section issue de la construction de masses de croyance géotechniques . . . . .	107
5	Dimensionnement du maillage commun avant la fusion . . . . .	108
6	Fusion des informations géophysiques et géotechniques . . . . .	108
6.1	Règle de Smets . . . . .	108
6.2	Règle de Dempster-Shafer . . . . .	109
6.3	Règle de PCR6 . . . . .	110
7	Conclusion . . . . .	111
<b>III</b>	<b>Etude de la sensibilité de la méthodologie de fusion . . . . .</b>	<b>113</b>
1	Introduction . . . . .	116
2	Modèle considéré et cadre de discernement . . . . .	117
3	Construction d'un modèle géoélectrique . . . . .	118
4	Simulation d'acquisition et inversion des sections de résistivités apparentes . . . . .	119
5	Résultats de l'attribution de masses de croyance à partir des différentes méthodes proposées . . . . .	121
5.1	Méthode 1 : distances de Wasserstein . . . . .	121
5.2	Méthode 2 : distances de Hausdorff . . . . .	123
5.3	Méthode 3 : distances de Wasserstein et classes concernées . . . . .	124
5.4	Méthode 4 : distances de Wasserstein et aire sous la Gaussienne . . . . .	126

5.5	Méthode 5 : Aire sous la Gaussienne . . . . .	127
5.6	Discussion . . . . .	129
6	Construction d'un modèle géotechnique et caractérisation du cadre de discernement . . . . .	129
7	Résultats de l'attribution des masses de croyance en fonction de la masse de croyance dans le sondage . . . . .	130
7.1	M(0)=0.25 . . . . .	130
7.2	M(0)=0.5 . . . . .	131
7.3	M(0)=0.75 . . . . .	132
7.4	M(0)=0.99 . . . . .	133
7.5	Discussion . . . . .	134
8	Résultats de l'attribution des masses de croyance en fonction de k . . . . .	135
8.1	k=0.25 . . . . .	135
8.2	k=0.5 . . . . .	136
8.3	k=1 . . . . .	136
8.4	k=2 . . . . .	136
8.5	Discussion . . . . .	137
9	Résultats de l'attribution des masses de croyance à partir d'un processus de somme entre deux sondages . . . . .	138
10	Résultats à l'issue de la fusion . . . . .	139
11	Conclusion . . . . .	143

**IV Fusion d'informations acquises sur un banc d'essai expérimental 145**

<b>A</b>	<b>Mise en place d'un banc d'essai expérimental . . . . .</b>	<b>148</b>
1	Introduction . . . . .	148
2	Méthodes d'acquisition . . . . .	148
2.1	Mini-dispositif de tomographie de résistivité électrique	149
2.2	Cône de pénétration de laboratoire . . . . .	150
3	Cahier des charges pour la sélection de matériaux constitutifs du banc d'essai . . . . .	151
4	Matériaux retenus et modèle proposé . . . . .	152
4.1	Matériaux retenus . . . . .	152
4.2	Modèle proposé . . . . .	154
5	Mise en place du modèle . . . . .	155
6	Conclusion . . . . .	157
<b>B</b>	<b>Fusion de données acquises sur banc d'essai . . . . .</b>	<b>158</b>
1	Introduction . . . . .	158
2	Cadre de discernement . . . . .	158
3	Traitement de l'information géophysique . . . . .	159
3.1	Résultats de l'acquisition géoélectrique et de l'inversion	159
3.2	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	161
3.3	Attribution des masses de croyance . . . . .	161
4	Méthode géotechnique . . . . .	162
4.1	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	162
4.2	Simulation d'acquisition . . . . .	163

	4.3	Attribution des masses de croyance . . . . .	163
	4.4	Discussion . . . . .	167
5		Résultats de fusion et discussion . . . . .	168
	5.1	Les différentes règles de combinaison . . . . .	170
	5.2	Influence du nombre et de la position des sondages .	171
	5.3	Considérations importantes et potentiel d'application	172
6		Conclusion . . . . .	173
<b>V Application à un ouvrage hydraulique réel</b>			<b>174</b>
<b>A</b>	<b>Application à un ouvrage hydraulique réel . . . . .</b>		<b>177</b>
1		Introduction . . . . .	177
2		Ouvrage hydraulique de St-Clément-des-Levées . . . . .	177
	2.1	Présentation et historique des précédentes campagnes	177
	2.2	Localisation des investigations et conditions environ-	
		nementales . . . . .	179
3		Tomographie de résistivité électrique . . . . .	180
	3.1	Dispositif et historique de mise en place . . . . .	180
	3.2	Traitement des données et résultats d'inversion . . .	181
4		Carottages et essais de granulométrie . . . . .	182
	4.1	Présentation de l'essai . . . . .	182
	4.2	Caractérisation des matériaux . . . . .	182
	4.3	Résultats . . . . .	183
5		Essais au CPT . . . . .	184
	5.1	Présentation de l'essai . . . . .	184
	5.2	Caractérisation des matériaux et $I_{SBT}$ . . . . .	185
	5.3	Résultats . . . . .	185
6		Conclusion . . . . .	186
<b>B</b>	<b>Méthodologie de fusion appliquée aux acquisitions sur ou-</b>		
	<b>vrage hydraulique réel . . . . .</b>		<b>188</b>
1		Introduction . . . . .	188
2		Cadre de discernement . . . . .	188
3		Section d'étude . . . . .	189
4		Source d'information géophysique : Tomographie de Résisti-	
		tivité Electrique . . . . .	190
	4.1	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	190
	4.2	Attribution des masses de croyance . . . . .	191
5		Sources d'information géotechniques : Essais de granulométrie	
		et essais CPT . . . . .	192
	5.1	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	192
	5.2	Essais de granulométrie . . . . .	193
	5.3	Essais de CPT . . . . .	196
6		Résultats de fusion . . . . .	198
	6.1	Fusion de données TRE et CPT . . . . .	198
	6.2	Fusion de données TRE et Essais de granulométrie .	200
	6.3	Fusion de données issues des trois sources d'informa-	
		tions . . . . .	201

---

6.4	Discussion . . . . .	203
7	Conclusion . . . . .	204
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>206</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>210</b>

---

# Table des figures

I.1	Diagram displaying the links between pathologies (in hexagons) and mechanisms that may lead to levee failure (slope sliding and four internal erosion mechanisms, in rectangles), after Dezert et al. (2017).	11
I.2	a) Deep rotational sliding of a levee. b) Shallow rotational sliding of the landside of a levee. c) Settlement of a levee on a soft soil foundation (Sharp et al., 2013) . . . . .	12
I.3	Principle of backward erosion (Sharp et al., 2013) . . . . .	13
I.4	Principle of concentrated leak erosion (Sharp et al., 2013) . . . . .	14
I.5	Principle of contact erosion (Sharp et al., 2013) . . . . .	15
I.6	Principle of suffusion (Sharp et al., 2013) . . . . .	15
I.7	Représentation de la fusion, modifiée d’après Martin (2005). . . . .	51
I.8	Indices de plasticité en fonction des limites de liquidité des alluvions. Illustration de l’utilisation de la méthode des moindres carrés avec droite de régression linéaire d’après Ohsaki (1962). . . . .	54
I.9	Représentation de la fonction de vraisemblance de distribution uniforme $(0, \theta)$ . Les lignes verticales représentent les données observées. Les trois premiers graphiques montrent $f(x; \theta)$ pour trois valeurs différentes de $\theta$ . Quand $\theta < X(n) = \max\{X_1, \dots, X_n\}$ , comme dans le premier graphique, $f(X(n); \theta) = 0$ et ainsi $L_n(\theta) = 0$ . Pour $f(X_i; \theta) = 1/\theta$ pour chaque $i$ et ainsi $L_n(\theta) = (1/\theta)^n$ . Le dernier graphique présente la fonction de vraisemblance, d’après Wasserman (2013). . . . .	56
I.10	Exemple d’un réseau de trois neurones artificiels ( $j, i$ et $k$ ). Les entrées sur le neurone $i$ sont de poids $w_{ij}$ alors que les sorties en aval sont de poids $w_{ki}$ , d’après Touzet (1992). . . . .	59
I.11	Exemple d’un réseau de neurones multicouches, d’après Touzet (1992).	60
I.12	Réseau de neurones multicouches à connexions a) locales, b) récurrentes, c) complètes, d’après Touzet (1992). . . . .	60
I.13	Exemple d’élicitations d’experts sur le forçage radiatif d’après Morgan and Keith (1995). . . . .	63
I.14	Représentation de la fonction d’appartenance trapézoïdale d’un sous-ensemble flou avec les trois principaux éléments le caractérisant. . . . .	65
II.1	Valeurs de masses de croyance, issues de la règle de combinaison de Dempster-Shafer, pour cartographier les risques de glissements de terrain dans l’Ouest de l’Iran, d’après Tangestani (2009). . . . .	86

II.2	Potentiel en eaux souterraines sous forme de fonctions de a) crédibilité et de b) plausibilité dans l'Ouest de l'Iran, après combinaison de DS, d'après Rahmati and Melesse (2016). . . . .	87
II.3	Représentation des étapes de la méthodologie de fusion développée, depuis la section initiale de digue considérée jusqu'à sa représentation finale avec masses de croyance correspondantes. . . . .	90
II.4	Représentation de la section bicouche de sous-sol considérée, constituée d'un matériau fin ( $\theta_1$ ) surmonté d'un matériau plus grossier ( $\theta_2$ ). . . . .	91
II.5	Modèle géoélectrique bi-couche considéré. . . . .	92
II.6	Gammes de valeurs de résistivités et conductivités pour différents types de matériaux. Les teintes plus claires correspondent aux matériaux pouvant être constitutifs des digues, d'après Palacky (1988). . . . .	93
II.7	Section de résistivités inversées. . . . .	95
II.8	Distribution sous forme de classes modales des valeurs de résistivités électriques issues de l'inversion permettant de caractériser les valeurs des bornes des intervalles associés aux hypothèses du cadre de discernement $\Theta$ . . . . .	96
II.9	Schéma présentant, en rouge, l'intervalle de résistivités inversées d'une maille de la section du sous-sol et en bleu, les classes de valeurs associées aux hypothèses de $\Theta$ . Dans un tel cas, l'hypothèse ayant la masse de croyance la plus importante est $\theta_1$ . . . . .	98
II.10	répartition des masses de croyance sur les hypothèses de $\Theta$ , proportionnellement à l'aire sous la gaussienne. . . . .	100
II.11	a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à la construction des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 1. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers. . . . .	101
II.12	Diagramme de classification de Robertson (1990), classant les types de sols en fonction des valeurs de résistances de pointe ( $q_c$ ) et du ratio de friction ( $R_f$ ). Mise en évidence des hypothèses de $\Theta$ associées à ces classes, pour $R_f = 3\%$ . . . . .	102
II.13	Représentation des sondages simulés au CPT sur la section de sous-sol considérée et leurs résistances de pointe associées (en $MPa$ ). . . . .	103
II.14	Construction du maillage pour le traitement de l'information géotechnique à partir d'un exemple de deux sondages ( $S1$ et $S2$ ). a) Représentation des valeurs géotechniques pour $S1$ et $S2$ en fonction de la profondeur. b) Les points de sondages sont divisés en mailles, chacune associée à une distribution de masses de croyance $M(0)$ . c) Discrétisation de la section en un maillage couvrant la totalité de la section. . . . .	105

II.15 a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à la construction des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages, $M(0) = 0.99$ et $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers. . . . .	107
II.16 Exemple d'une superposition de discrétisation géophysique (bleu) et géotechnique (rouge) proposant un nouveau maillage irrégulier sur lequel sont ensuite réalisés les calculs de combinaisons de masses lors de la fusion. . . . .	108
II.17 a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, avec hypothèse d'un monde ouvert de Smets. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers. . . . .	109
II.18 a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, avec hypothèse d'un monde fermé et utilisation de la règle de combinaison de Dempster-Shafer. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers. . . . .	110
II.19 a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, avec hypothèse d'un monde fermé et utilisation de la règle de combinaison de PCR6. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers. . . . .	111
III.1 Représentation de la section tricouche de sous-sol considérée, composée d'un matériau fin ( $\theta_1$ ) surmonté d'un matériau intermédiaire ( $\theta_2$ ) et d'un matériau plus grossier ( $\theta_3$ ). . . . .	117
III.2 Modèle géoélectrique considéré, avec non distinction des matériaux géologiques correspondant aux hypothèses $\theta_2$ et $\theta_3$ . . . . .	119
III.3 Profils de résistivités apparentes en fonction de la position en x et de l'écartement inter-électrode ( $a$ ) considéré, a) sans bruit, b) pour un niveau de bruit de 5% et c) pour un niveau de bruit de 15 %, configuration Wenner. . . . .	120
III.4 Section de résistivités inversées (norme L1) pour une acquisition a) sans bruit, b) avec un niveau de bruit de 5%, c) avec un niveau de bruit de 15%. . . . .	121
III.5 i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 1. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l'emplacement réel des interfaces entre les matériaux. . . . .	122

III.6 i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 2. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l'emplacement réel des interfaces entre les matériaux. . . . .	124
III.7 i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 3. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l'emplacement réel des interfaces entre les matériaux. . . . .	125
III.8 i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 4. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l'emplacement réel des interfaces entre les matériaux. . . . .	127
III.9 i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 5. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l'emplacement réel des interfaces entre les matériaux. . . . .	128
III.10 Représentation des sondages simulés au CPT sur la section de sous-sol considérée et leurs résistances de pointe associées (MPa). . . . .	130
III.11a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages, $M(0) = 0.25$ et $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . .	131
III.12a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages, $M(0) = 0.5$ et $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . .	132
III.13a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages, $M(0) = 0.75$ et $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . .	133

III.14a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . . 134

III.15a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 0.25$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . . 135

III.16a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 0.5$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . . 136

III.17a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 2$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . . 137

III.18a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de somme inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux. . . . . 138

III.19a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Masse de croyance intrasondage retenue de  $M(0) = 0.25$ . Résultats de fusion pour données géophysiques non bruitées et i)  $k = 2$ , ii)  $k = 0.25$ , et pour données géophysiques avec un bruit de 15% et iii)  $k = 2$  et iv)  $k = 0.25$ . . . . . 140

III.20a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Masse de croyance intrasondage retenue de  $M(0) = 0.99$ . Résultats de fusion pour données géophysiques non bruitées et i)  $k = 2$ , ii)  $k = 0.25$ , et pour données géophysiques avec un bruit de 15% et iii)  $k = 2$  et iv)  $k = 0.25$ . . . . . 141

III.21a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats de fusion avec i) hypothèse d'un monde ouvert de Smets, ii) règle de combinaison de Dempster-Shafer, iii) règle de combinaison de PCR6. . . . .	143
IV.1 Mini dispositif de TRE à 48 électrodes espacées de 1 cm, à hauteur réglable, utilisé pour l'acquisition géoélectrique sur le banc d'essai. . . . .	149
IV.2 a) Mini dispositif d'électrodes pour caractérisation de matériaux non cohésifs, b) mini dispositif d'électrodes creuses pour caractérisation de matériaux non pénétrables. . . . .	150
IV.3 Cône de pénétration de laboratoire. . . . .	151
IV.4 a) Pluviation de sable d'Hostun dans un volume d'eau, b) caractérisation électrique du plâtre. . . . .	154
IV.5 Schéma en coupe longitudinale du banc d'essai expérimental à mettre en place. . . . .	155
IV.6 Mise en place du banc d'essai expérimental et caractérisation électrique du plâtre a priori (b) et a posteriori (d). . . . .	156
IV.7 Section idéalisée, représentative des hypothèses de $\Theta$ associées aux matériaux constitutifs du banc d'essai. . . . .	159
IV.8 Profils de résistivités apparentes en fonction de l'abscisse longitudinale $X$ et de l'écartement inter-électrodes considéré ( $a$ en cm), en configuration Wenner. . . . .	160
IV.9 Section de résistivités inversées (norme L1) après acquisition sur banc d'essai expérimental. . . . .	160
IV.10 Distribution sous forme de classes modales des valeurs de résistivités électriques issues de l'inversion, permettant de caractériser les valeurs des bornes des intervalles associés aux hypothèses de $\Theta$ . . . . .	161
IV.11a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). . . . .	162
IV.12 Exemple des deux types de sondages Sd 1 et Sd 2 pouvant être simulés au sein du modèle. . . . .	163
IV.13a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques avec 2 sondages et $k = 0.1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). . . . .	164
IV.14a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques avec 3 sondages et $k = 0.1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). . . . .	165
IV.15a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques avec 5 sondages et $k = 0.1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). . . . .	166

IV.16a)	Représentations des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques avec 8 sondages. b) Représentations des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). i) Pour $k = 0.1$ , ii) pour $k = 0.5$ . . . . .	167
IV.17	Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée en a) et c) avec leurs valeurs de masses associées b) et d). Pour une simulation de i) 2 sondages, ii) 3 sondages, iii) 5 sondages et iv) 8 sondages. Pour chaque cas, les figures (a,b) sont obtenus avec combinaison de Smets et les figures (c,d) sont obtenus avec combinaison de PCR6. . . . .	169
IV.18a)	Représentations des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentations des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats de fusion avec i) hypothèse d'un monde ouvert de Smets, ii) règle de combinaison de Dempster-Shafer, iii) règle de combinaison de PCR6. . . . .	170
V.1	Localisation de la digue de Loire de St-Clément-des-Levées (49) . . .	178
V.2	Coupe lithologique schématisée de la digue de St-Clément-des-Levées présentant les positions des matériaux géologiques et les positions des lignes d'électrodes à demeure dans l'ouvrage (modifié d'après Jodry et al. (2019)). . . . .	178
V.3	Digue de St-Clément-des-levées avec localisation de la ligne d'électrodes enfouies, des positions des piézomètres et des sondages géotechniques (CPT et carottages). . . . .	179
V.4	a) Réalisation de la tranchée côté val, b) mise en place des électrodes, c) compactage du remblai et d) mise en place de la couche de forme (photo côté Loire). Modifié d'après Hupin and Hervé (2009). . . . .	180
V.5	Coupe longitudinale de résistivités inversées de la digue de protection de St-Clément-des-Levées, obtenue après inversion des données de résistivité apparente (Wenner-Schlumberger) acquises à partir de la ligne d'électrodes A (cf. Figure V.2). . . . .	181
V.6	Foreuse carotteuse Texoma sur la digue de St-Clément-des-Levées lors de la campagne de reconnaissance. . . . .	182
V.7	Exemple de la carotte n° 1 avec délimitations établies par le technicien au laboratoire (en rouge), profondeurs renseignées sur les étiquettes en considérant la profondeur 0 m comme étant la position verticale des électrodes (1.10 m sous la surface). . . . .	183
V.8	Représentation de la répartition des classes de matériaux « A » et « B » (norme NF P 11-300 (1992)) suite à l'analyse granulométrique d'échantillons issus de 4 carottes prélevées sur la digue de St-Clément-des-Levées. Les plages bleues et jaunes représentent les échantillons analysés et leur classe de matériau associée. Les flèches représentent l'extension jugée valide de cette caractérisation, en accord avec l'inspection visuelle préalable du géotechnicien. . . . .	184
V.9	a) Machine Gouda et b) pointe utilisée sur la digue de protection de St-Clément-des-Levées pour les essais CPT. . . . .	184

V.10	Profils verticaux de valeurs d' $I_{SBT}$ pour chaque sondage mettant en évidence la classe granulométrique de sol associée. . . . .	186
V.11	Schéma représentant la prise en compte des informations géotechniques extérieures à la section caractérisée par la source géophysique. L'opération de fusion n'a en revanche lieu que sur la surface dont les limites correspondent aux positions de la première et dernière électrode (surface non grisée). Les flèches symbolisent la décroissance exponentielle latérale de la confiance en l'information géotechnique depuis les sondages. . . . .	189
V.12	Distribution sous forme de classes modales des valeurs de résistivités électriques issues de l'inversion. . . . .	190
V.13	a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issues de l'information géophysique et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). . . . .	192
V.14	Schéma représentatif de la section de digue étudiée, avec la position des essais géotechniques (pointillés noirs) et les hypothèses de $\Theta$ associées aux valeurs d' $I_{SBT}$ (pointillés blancs) et aux résultats d'essais de granulométrie (lignes blanches). . . . .	193
V.15	Représentation de l'extension verticale de l'information granulométrique. Exemple des résultats issus des analyses granulométriques réalisées sur la carotte 2. . . . .	194
V.16	a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d'information géotechnique (essais de granulométrie) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale $k = 0.1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . .	195
V.17	a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d'information géotechnique (essais de granulométrie) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale $k = 1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . .	196
V.18	a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d'information géotechnique (CPT) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale $k = 0.1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . .	197
V.19	a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d'information géotechnique (CPT) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale $k = 1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . .	198

V.20 Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d) après combinaison des informations issues de la TRE et du CPT. Une valeur de  $k = 0.1$  est retenue pour les figures i) et une valeur de  $k = 1$  est retenue pour les figures ii). Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets et les figures (c, d) sont obtenues avec combinaison de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . . 199

V.21 Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d) après combinaison des informations issues de la TRE et des analyses granulométriques. Une valeur de  $k = 0.1$  est retenue pour les figures i) et une valeur de  $k = 1$  est retenue pour les figures ii). Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets et les figures (c, d) sont obtenues avec combinaison de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . . 200

V.22 Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d) après combinaison des informations issues des trois sources d'information considérées. Une valeur de  $k = 0.1$  est retenue. Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets et les figures (c, d) sont obtenues avec la règle de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . . 201

V.23 Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c, e) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d, f) après combinaison des informations issues des trois sources d'information considérées. Une valeur de  $k = 1$  est retenue. Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets, (c, d) avec la règle de Dempster-Shafer et les figures (e, f) sont obtenues avec la règle de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques. . . . . 202

---

# Liste des tableaux

I.1	Failure statistics for large dams up to 1986 considering each failure mechanism (Foster et al., 2000b) . . . . .	12
I.2	The ERT method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	17
I.2	The ERT method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	18
I.3	The SP method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	19
I.3	The SP method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	20
I.4	The IP method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	21
I.4	The IP method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	22
I.5	The low-frequency near-field EMI method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	23
I.5	The low-frequency near-field EMI method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	24
I.6	The GPR method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	25
I.6	The GPR method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	26
I.7	The NMR method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	27
I.7	The NMR method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	28
I.8	The seismic tomography method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	29
I.8	The seismic tomography method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	30
I.9	The MASW method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	31
I.9	The MASW method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	32
I.10	The micro-gravimetry method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	33

I.11	The IR thermography method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	34
I.11	The IR thermography method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	35
I.12	The drilling parameters recordings ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	37
I.12	The drilling parameters recordings ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	38
I.13	The CPT method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	39
I.13	The CPT method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	40
I.14	The field vane shear test method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	41
I.15	The pressuremeter method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	42
I.15	The pressuremeter method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	43
I.16	The Lefranc test method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	44
I.17	The Permeafor test method ability to characterize levee properties and characteristics. . . . .	45
I.18	Ability for geophysical and geotechnical methods to characterize a levee physical property or characteristic in most appropriate conditions given the literature used in this work. +++ corresponds to a strong relation between a parameter and a levee property, ++ corresponds to a reasonably good estimation of a property, + is associated to the existence of a very restricted sensitivity or to a method little employed or still under study while 0 means that the method is unable to characterize the property or that there is a lack of information in the browsed literature. Crosses in brackets are here to symbolize the lack of application of a specific method for characterizing a specific property on levees. Such symbols highlight the unexplored potentials for levee application. . . . .	48
II.1	Masses de croyance attribuées à chacune des hypothèses pour les sources d'information n° 1 et 2. . . . .	82
II.2	Intersections des différentes hypothèses considérées. . . . .	83
II.3	Masses de croyances combinées issues des trois règles de combinaison retenues. . . . .	84
II.4	Masses de croyance attribuées à chacune des hypothèses pour les sources d'information n° 1 et 2. . . . .	84
II.5	Intersections des différentes hypothèses considérées. . . . .	84
II.6	Masses de croyances combinées issues des trois règles de combinaison retenues. . . . .	85

---

II.7	Exemple d'une distribution de masses de croyance géotechniques, cas de $m_2^{(l+r)}(\cdot) > 1$ . . . . .	106
II.8	Exemple d'une distribution de masses de croyance géotechniques, cas de $m_2^{(l+r)}(\cdot) < 1$ . . . . .	106
IV.1	Résistivités électriques apparentes, assimilées à de véritables résistivités sous l'hypothèse d'un matériau homogène et isotrope dans le volume testé ( $\Omega.m$ ), des matériaux retenus pour la mise en place au sein du banc d'essai. . . . .	153
IV.2	Valeurs de profondeurs d'enfoncement (mm) des matériaux, caractérisés au cône de pénétration de laboratoire, retenus pour la mise en place au sein du banc d'essai. . . . .	155
V.1	Dates auxquelles ont été réalisés les différents essais de reconnaissance sur la digue de St-Clément-des-Levées lors de l'été 2018. . . . .	180
V.2	Classes granulométriques de sols en fonction des valeurs de $I_{SBT}$ (Robertson, 2010). . . . .	185

---

# Introduction

## Contexte et problématique

Les inondations représentent le risque naturel à l'origine du plus grand nombre de dommages humains et matériels. Pour tenter de limiter les dommages pouvant être causés par des crues, intempéries ou tempêtes, l'Homme a érigé au cours de son Histoire différents types d'ouvrages hydrauliques (digues, barrages). En France, les premières traces d'ouvrages hydrauliques à but protecteur remontent au VIII<sup>ème</sup> siècle aux abords de la Loire. Il s'agissait alors de turcies, digues constituées d'assemblages de bois et de terre ayant pour objectif de ralentir les écoulements en période de crue pour la protection des terres agricoles face à l'érosion. Ces ouvrages n'avaient pas encore la prétention de vouloir contrôler le cours de l'eau ni d'empêcher les inondations. Au fil des siècles, les ouvrages ont été progressivement élevés et consolidés, permettant aux hommes de construire et de s'installer derrière ceux-ci. Les crues historiques responsables de la rupture de certains ouvrages ont amené l'être humain à accroître sans cesse leur hauteur et à trouver des solutions complémentaires (déchargeoirs, barrages).

Les digues de protection fluviales représentent **plus de 8 600 km** d'ouvrages sur le territoire national (CEPRI, 2011). Ce sont des ouvrages très hétérogènes, de part leur mode de construction et leur historique (ruptures et réparations, rehausses...). Elles sont souvent assez mal connues et nécessitent donc de meilleures caractérisations pour garantir que leurs fonctions essentielles de protection soient assurées.

Afin de prévenir le risque de rupture d'ouvrage, susceptible de mener à de catastrophiques conséquences telles que des pertes humaines et économiques, les digues de protection requièrent un diagnostic. Ce diagnostic nécessite une surveillance toute particulière et passe tout d'abord par une reconnaissance visuelle, en complément de recherches historiques et bibliographiques. Des études hydrauliques, morphodynamiques, topographiques et géologiques peuvent également venir compléter le niveau de connaissance de l'ouvrage et de son environnement proche. Enfin, des méthodologies reconnues pour l'évaluation des digues impliquent des **méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques**.

Ces deux familles de méthodes sont complémentaires mais rarement considérées de manière conjointe. Au mieux, les résultats obtenus par chacune des méthodes sont simplement superposés. Les méthodes géophysiques sont **non intrusives** et

fournissent une information physique sur **d'importants volumes** de sols avec de grands rendements mais avec des **incertitudes potentiellement significatives**. Ces incertitudes sont notamment dues aux aspects intégrants et indirects des méthodes ainsi qu'à la résolution de problèmes inverses intrinséquement mal posés. De plus, la grandeur physique mesurée ne rentre pas dans les modèles de justification des ouvrages vis-à-vis des modes de rupture. Les méthodes de reconnaissance géotechnique, quant à elles, sont **intrusives** et fournissent une information plus **ponctuelle** mais également plus précise et plus adaptée à l'analyse des modes de rupture. Un enjeu important pour l'évaluation des digues de protection fluviales est d'être capable de combiner mathématiquement les données géophysiques et géotechniques acquises, tout en prenant en considération leurs **imperfections** et **distributions spatiales** respectives. Nous posons alors la problématique suivante :

*Il s'agit de proposer une méthodologie de combinaisons d'informations, issues de reconnaissances géophysiques et géotechniques, tenant compte des spécificités de chaque méthode en termes d'imperfection associée aux données ainsi que de répartition spatiale de l'information. Cette nouvelle méthodologie doit permettre d'améliorer la caractérisation des ensembles lithologiques au sein des ouvrages hydrauliques tout en associant un indice de confiance aux résultats proposés.*

Dans ce travail de thèse, nous proposons l'utilisation de modèles de fusion d'informations, et retenons la **théorie des masses de croyance**, pour combiner les données issues de ces deux familles de méthodes de reconnaissance afin de présenter une caractérisation de l'ouvrage plus proche de ce à quoi il correspond.

## Démarche de recherche

Nous retenons une démarche intellectuelle afin de répondre à la problématique fixée, pouvant être divisée en cinq étapes :

**Étape I** : s'approprier les fondements et réaliser l'état de l'art de l'objet d'étude qu'est la digue de protection contre les inondations ainsi que des méthodes d'investigation géotechniques et géophysiques employées dans le cadre de campagnes de reconnaissance.

**Étape II** : s'approprier les principes des modèles de combinaison de l'information existants afin d'en retenir un en mesure de répondre aux exigences fixées par la problématique.

**Étape III** : développer une méthodologie de fusion et la valider sur un modèle simple et connu, à partir de données simulées.

**Étape IV** : adapter la méthodologie à des modèles plus complexes et à différents jeux de données.

**Étape V** : expérimenter l'emploi de la méthodologie à partir de données physiques

acquises sur un modèle expérimental en laboratoire et validation à partir de données acquises in situ sur un véritable ouvrage.

Dans ce manuscrit de thèse, nous proposons d'articuler cette démarche sous la forme de cinq chapitres.

## Description succincte des chapitres du manuscrit

**Chapitre I** : présentation de l'objet d'étude « digue de protection contre les inondations » et de ses mécanismes de rupture et pathologies associées. Présentation également d'un grand nombre de méthodes d'investigation géophysiques et géotechniques communément utilisées lors de campagnes de reconnaissances sur ouvrage hydraulique et mise en avant de leur capacité à caractériser les propriétés d'ouvrages potentiellement pathologiques. Plusieurs modèles de combinaison sont finalement introduits et comparés afin d'être en mesure de retenir l'approche de fusion la plus pertinente pour répondre à la problématique fixée. Cette approche est celle décrite par la théorie des masses de croyance.

**Chapitre II** : description détaillée de la théorie des masses de croyance avec présentation de trois règles de combinaisons spécifiques. Présentation point par point de la méthodologie de combinaison d'informations géophysiques et géotechniques développée. Détail des méthodes d'attribution des masses de croyance pour chacune des sources d'information, de leur représentation sous forme de section de sous-sol ainsi que de la combinaison des masses attribuées et de la présentation finale sous forme de résultats associés à un indice de confiance.

**Chapitre III** : étude de sensibilité de la méthodologie en considérant différentes méthodes d'attribution de masses de croyance pour la part géophysique de l'information et différentes valeurs de paramètres d'entrée pour la part géotechnique. Ce travail se base sur des études synthétiques afin de souligner l'intérêt et les limites de chaque méthode d'attribution et de valeurs de paramètres. Le modèle de sous-sol considéré est un modèle légèrement plus complexe que celui considéré au Chapitre II.

**Chapitre IV** : mise en place d'un modèle expérimental en laboratoire afin d'acquérir de véritables jeux de données à utiliser dans le cadre de la méthodologie de fusion développée. Détail de la sélection et caractérisation des matériaux mis en place au sein du modèle ainsi que vérification de la faisabilité de la méthodologie à partir de données réelles sur un modèle connu et contraint. Les résultats sont détaillés et comparés pour différentes positions et nombres de sondages simulés.

**Chapitre V** : utilisation de la méthodologie de fusion à partir de données acquises lors d'une véritable campagne de reconnaissance sur une digue de protection fluviale. Présentation de l'historique de l'ouvrage et des méthodes de reconnaissance employées. Détail du traitement de l'information et de l'emploi des données dans le cadre de la méthodologie développée pour proposer une caractérisation sous forme de section verticale de l'ouvrage sur la section investiguée, à partir de la fusion d'in-

formations issues de trois sources distinctes.

En fin de manuscrit, une synthèse et une conclusion de l'ensemble de ce travail de thèse sont présentes. Les nombreuses perspectives qu'ouvrent ces travaux sont également rapportées.

---

# Chapitre I

Les digues et leurs propriétés,  
méthodes de reconnaissance  
géophysiques et géotechniques,  
modèles de combinaison de  
l'information

---

Ce premier chapitre de thèse se compose de deux Parties. Le lecteur retrouvera dans la **Partie A** le contenu de l'article *Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : a Review* publié dans *Engineering Geology* (Dezert et al., 2019a) ; avec une mise à jour de la conclusion de sorte à entrer en adéquation avec le format de ce manuscrit de thèse. Afin d'éviter les doublons avec le contenu des autres chapitres, les références bibliographiques de l'article sont déplacées au sein de l'ensemble des références, en fin de manuscrit. Cette partie consiste à présenter l'objet d'étude qu'est la digue de protection fluviale ainsi que ses mécanismes de rupture et pathologies associées. Un grand nombre de méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques est ensuite présenté en mettant en avant leur capacité à caractériser des propriétés d'ouvrages potentiellement pathologiques. Dans la **Partie B**, nous présentons plusieurs modèles de combinaison de l'information avant d'en retenir un qui sera employé dans la méthodologie de fusion d'informations issues de sources géophysiques et géotechniques que nous proposons.

---

# Chapitre 1

---

<b>A</b>	<b>Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : a Review</b> . . . . .	9
1	Introduction . . . . .	9
2	Fluvial levees and related pathologies . . . . .	10
2.1	Fluvial levees . . . . .	10
2.2	Failure mechanisms and associated physical properties and characteristics . . . . .	11
3	Geophysical investigation methods . . . . .	15
3.1	DC-Electrical Resistivity methods . . . . .	16
3.2	Self potential method . . . . .	19
3.3	Induced polarization method . . . . .	20
3.4	Low-frequency near-field electromagnetic induction method (Slingram) . . . . .	22
3.5	Ground penetrating radar method . . . . .	24
3.6	Nuclear magnetic resonance (NMR) method . . . . .	27
3.7	Seismic refraction tomography method . . . . .	28
3.8	Multi-channel analysis of surface waves (MASW) method . . . . .	30
3.9	Acoustic method . . . . .	32
3.10	Micro-gravimetry method . . . . .	32
3.11	Temperature based method . . . . .	34
4	Geotechnical investigation methods . . . . .	35
4.1	Laboratory testing on soil samples . . . . .	35
4.2	Drilling parameters recordings . . . . .	36
4.3	Cone penetrometer test . . . . .	38
4.4	Field vane shear test . . . . .	40
4.5	Pressuremeter test . . . . .	41
4.6	Hydraulic permeability tests . . . . .	43
5	Discussion . . . . .	45
6	Conclusion . . . . .	49
<b>B</b>	<b>Modèles de combinaison et de fusion de l'information</b> . . . . .	50
1	Introduction . . . . .	50
2	Qualité de l'information et formes d'imperfection . . . . .	52
2.1	Incomplétude . . . . .	52
2.2	Imprécision . . . . .	53
2.3	Incertitude . . . . .	53
2.4	Inconsistance . . . . .	53
3	Amélioration de la donnée en entrée . . . . .	53
3.1	Méthode des moindres carrés . . . . .	54
3.2	Méthode du maximum de vraisemblance et du maximum a posteriori . . . . .	55
3.3	Méthode du filtre de Kalman . . . . .	56
4	Modèles de combinaison . . . . .	58

---

4.1	Réseaux de neurones artificiels . . . . .	59
4.2	Théorie des probabilités « fréquentiste » . . . . .	61
4.3	Théorie des probabilités subjectives . . . . .	62
4.4	Théorie des sous-ensembles flous . . . . .	64
4.5	Théorie des possibilités . . . . .	66
4.6	Théorie des masses de croyance . . . . .	67
5	Ajustement du résultat en sortie . . . . .	69
6	Conclusion . . . . .	70

---

## Partie A

# Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : a Review

## 1 Introduction

Fluvial levees are manmade structures built up for flood protection (Brierley et al., 1997). They are considered as hazardous structures that can fail and lead to disastrous consequences such as human or material loss and economic disasters (van der Veen et al., 2003). To prevent the risk of failure, it is required to carry out survey campaigns in order to assess the stability of levees. Fluvial levees are very various : their age, history, structure and composition materials make each one unique (Foster et al., 2000b) and more or less subject to failure in weak zones under specific loads. The purpose of the assessment is to verify the levee serviceability level in comparison with design serviceability level. It is firstly based on technical surveys able to establish if specific pathologies that could lead to failure mechanisms are present in the levee structure. In order to perform a reliable assessment, it is required to be aware of the relations linking these pathologies to the different existing failure mechanisms.

There are globally acknowledged methodologies for levee assessment (Royet et al., 2013) that include a phase of investigation involving geophysical investigation methods (Kearey et al., 2013) and geotechnical investigation methods (Look, 2014). Geophysical methods provide a physical information on large volumes of subsoil with potentially important related uncertainties. These associated uncertainties are notably due to the resolution of inverse problems and to the indirect and integrative aspects of the methods. These methods are non-intrusive, unlike geotechnical investigation methods that provide more punctual and more accurate information. The aim of this paper is to place on an equal footing these two types of methods in order to assist agencies and levee managers in selecting the most relevant methods to characterize the vulnerability of a levee, according to a type of pathology and to the environmental constraints, in an effective way. In this work, we confine ourselves exclusively to fluvial levees and to survey campaigns excluding monitoring end well logging methods. Even though monitoring techniques bring a lot to fluvial levee diagnosis (Bièvre et al., 2018; Sjö Dahl et al., 2008), these methods are more efficient for levees exposed to constant hydraulic loads.

This review has the double aim of creating interest in the levee managers (decision makers) and in the research community as well. The large number of introduced methods and their abilities to characterize a specific property or characteristic, un-

der particular conditions, can be a useful tool for a levee manager willing to set up a levee investigation or to departments looking for references. The great number of bibliographic references can spotlight the potential lack of information concerning specific methods, inform on the advantages and drawbacks of the methods for the levee investigation, work on the methods complementarities and suggest new method combinations.

First, we introduce the role of fluvial levees and describe the failure mechanisms and associated pathological physical properties and characteristics. Then, in the first instance we present the role of geophysical investigation methods for characterizing these pathologies and as a second step, geotechnical investigation methods are presented equally. The order of presentation of the investigation methods depends on their physical fields. Finally, we discuss the lack of information about specific investigation methods and introduce references on studies combining different kinds of investigation methods.

## 2 Fluvial levees and related pathologies

### 2.1 Fluvial levees

The primary function of flood embankments is to retain a water level. According to the type of structure, the intended goal can be different : water storage (dams), channeling (canal dike) or protection of a delimited area (flood embankments). The two essential properties of flood embankments are a) the mechanical resistance and b) the watertightness. The mass, as well as the composition and morphology of the levee determine its capacity to resist to the hydraulic charge, which is a function of the water quantity. A part of the embankment is made of impervious materials (clays, silts) guaranteeing the watertightness.

Foster et al. (2000b) present twelve kinds of flood embankments. There, a distinction is made between the homogeneous embankments and the zoned and more recent ones. For homogeneous embankments, the same materials guarantee simultaneously the watertightness and mechanical resistance functions. A low compactness often characterizes these structures (François et al., 2016). The zoned embankments frequently include a clayey core to guarantee the watertightness with a coarser material around it to ensure the stability. In addition, many different ways to reinforce the structure can be found such as rock fill, drains, sheet piling, concrete layers... (Foster et al., 2000b).

Each flood protection embankment is unique, since many different materials and construction methods exist, the nature of its structure goes hand in hand with its environment (Sharp et al., 2013). Geographically, the structure type can be very variable according to the different materials available, loads, history, culture and economy of the region. Because of important floods, various levees have been submitted to successive heightenings, filling of breaches, rockfillings or drains adding. These modifications may be responsible of unequal and heterogeneous composition

of the construction work in terms of granulometry and compactness (Dion, 1961).

## 2.2 Failure mechanisms and associated physical properties and characteristics

Four types of mechanisms (Fauchard and Mériaux, 2007; François et al., 2016) can lead to the failure of a flood protection embankment : overflowing, sliding instability, external erosion and internal erosion. These mechanisms are unfortunately not exclusive and may be responsible for the formation of a breach leading to the failure of the levee (Nagy, 2012). Failure scenarios consisting of combinations and sequences of failure mechanisms must be considered. In this work, we will only be considering the slope instability phenomenon and the four different types of internal erosion (backward erosion, concentrated leak erosion, contact erosion and suffusion). To characterize the sensitivity of a soil to external erosion processes, the JET (jet erosion test) (Marot et al., 2011) and MoJET (mobile jet erosion test) (Henensal and Duchatel, 1990) can be used in laboratory or in-situ. Most of the times, a visual inspection can identify the indicators of external erosion while the overflowing mechanism corresponds to the overflowing of the crest by the water, which depends on geometrical criteria (Herrier et al., 2014).

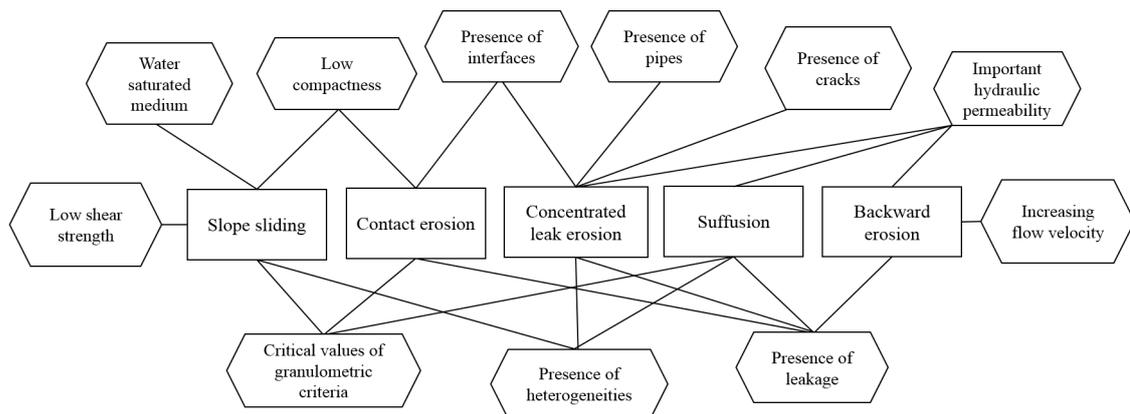


FIGURE I.1 – Diagram displaying the links between pathologies (in hexagons) and mechanisms that may lead to levee failure (slope sliding and four internal erosion mechanisms, in rectangles), after Dezert et al. (2017).

Complete information concerning internal erosion can be found in (Fell and Fry, 2007; François et al., 2016; Fry, 2012; Morris, 2012; Sharp et al., 2013), while information on the slope instability mechanisms is available in (Jia et al., 2009; Rinaldi et al., 2004; Sharp et al., 2013; Varnes, 1978).

Various physical material properties (hydraulic permeability, compactness...) and levees characteristics (presence of heterogeneities within the levee body and foundation, presence of man-made pipes...) associated with specific pathologies (low compactness, high hydraulic permeability, low shear strength...) characterize these

mechanisms and increase their probability of occurrence (Figure I.1).

TABLE I.1 – Failure statistics for large dams up to 1986 considering each failure mechanism (Foster et al., 2000b)

Mode of failure	% of total failures
Piping through embankment	31
Piping through foundation	15
Piping through embankment to foundation	2
Slope instability	4
Overtopping	46
Earthquake	2

For large dams, failure statistics up to 1986 are proposed by Foster et al. (2000a) (Table I.1). External erosion mechanisms are not expressly presented since they can lead to piping (internal erosion), slope instability or overtopping which are included in the table. Danka and Zhang (2015) propose others statistics of observed failure mechanisms, relying on 1 000 levee failure cases while Nagy (2012) summarizes various authors' works on statistics of mechanisms of dikes and dams damage and failure. Globally, the overflowing (or overtopping) mechanism is responsible of about 50% of levee failures.

### 2.2.1 Slope instability

Sharp et al. (2013) explain that : « the instability occurs when the active strengths of soil particle movement exceed the resistant strengths. » There are various processes associated to the slope instability mechanism such as superficial or rotational sliding, settlement or liquefaction. All these processes can occur on both sides of a flood protection embankment.

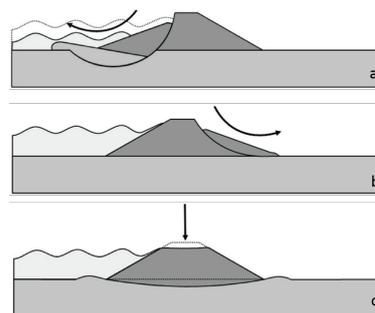


FIGURE I.2 – a) Deep rotational sliding of a levee. b) Shallow rotational sliding of the landside of a levee. c) Settlement of a levee on a soft soil foundation (Sharp et al., 2013)

Superficial and rotational sliding (Figure I.2) tend to occur when the shear strength of the materials constitutive of the levee body and/or its foundation, is

insufficient to keep its geometry in its original configuration (Poulain et al., 2015). Settlement is associated to the lowering of the crest level. Liquefaction is deeply associated with the seismic activity, causing the loss of resistance of a sandy water saturated material, with a great increase of the interstitial pressure (Bertil, 2007).

Varnes (1978) explains that these mechanisms need a water-saturated medium to occur. They are promoted when the levee slope is steep, when there is a low compactness and/or high charge and when there is little draining and presence of heterogeneities. The granulometric criteria also play an important part in the slope sliding mechanism since it is directly linked to the material shear strength and to its ability to be well compacted or not (Sharp et al., 2013). Finally, this phenomenon can be reinforced by a rapid receding water level.

### 2.2.2 Internal erosion

The pullout of particles and their migration within the levee or its foundation characterize the internal erosion process (Sharp et al., 2013). This phenomenon tends to occur when the hydraulic forces are strong enough to initiate the movement of the soil particles and when the porosity and hydraulic permeability are great enough to allow them to migrate (Bonelli et al., 2012). Four types of internal erosion processes are defined : backward erosion, concentrated leak erosion, contact erosion and suffusion.

### 2.2.3 Backward erosion

Morris (2012) describes the backward erosion process as a detachment of soil particles occurring when a seepage exits to an unfiltered surface. A pipe is formed regressively from downstream to upstream with an increase of the flow velocity and hydraulic gradient (Figure I.3). This erosion process is only made possible in non-plastic soils (Richards and Reddy, 2012). van Beek et al. (2011) and Sellmeijer et al. (2011) experimentally validate a model for the characterization of the backward erosion mechanism.

The presence of leakage, an increasing flow velocity and an important hydraulic permeability are susceptible to lead to a backward erosion phenomenon (François et al., 2016; Sharp et al., 2013).

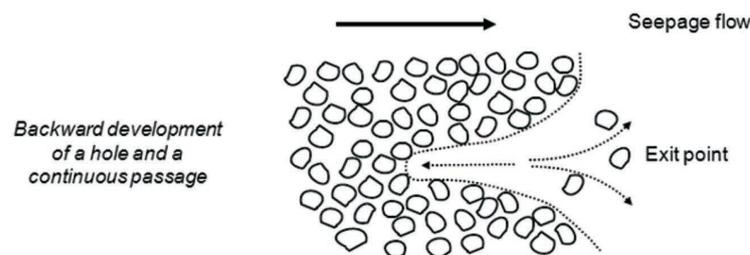


FIGURE I.3 – Principle of backward erosion (Sharp et al., 2013)

### 2.2.4 Concentrated leak erosion

Concentrated leak erosion occurs in the interstices of the levee, which could correspond to worm galleries, open cracks, voids left by roots, spaces around man-made pipes, etc... It can also occur in a permeable area for a critical shear stress value, induced by flows (Sharp et al., 2013). The particles are pulled out from the void sides, increasing its diameter (Figure I.4).

Historically, Wan and Fell (2002, 2004a,b) propose the first interpretation of concentrated leak erosion with a laboratory test : the Hole Erosion Test (HET). Bonelli and Brivois (2008) and Benahmed and Bonelli (2012) work on a new model to interpret with greater accuracy the HET results. The HET is the only test able to evaluate the concentrated leak erosion risk by giving the critical shear stress value (Pa) and the coefficient of erosion ( $s.m^{-1}$ ). The change of scale of these results, from the laboratory test to a real levee is still under study.

François et al. (2016) indicate many characteristics that could potentially foster the development of this kind of internal erosion process such as presence of interfaces, man-made pipes, cracks and heterogeneities. The presence of leakage can be indicative of such a mechanism. Finally, an important hydraulic permeability would also be conducive to concentrated leak erosion.

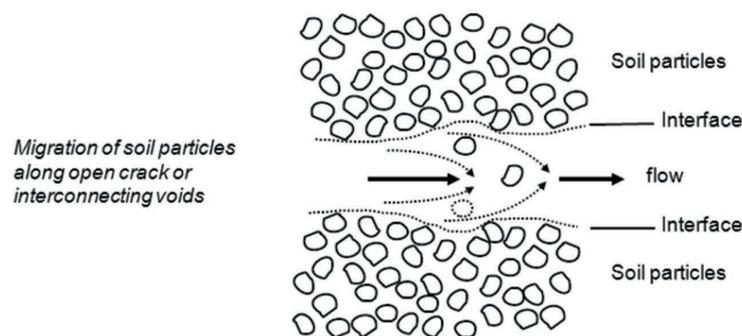


FIGURE I.4 – Principle of concentrated leak erosion (Sharp et al., 2013)

### 2.2.5 Contact erosion

This process takes place at the interface between two materials with distinct granulometry and with the presence of a parallel water flow. Fine particles are pulled out and transported through the coarser material (Figure I.5). This kind of erosion can also be observed between two layers, one of which is fractured. To make this phenomenon possible, a geometric condition and a hydraulic condition must be fulfilled. The geometric condition consists in having pores large enough to let the fine particles pass through while the hydraulic condition consists in having a water flow strong enough to pull out these particles (Chevalier and Bonelli, 2017). To deepen this topic, we suggest the work of Guidoux et al. (2009) and Beguin (2011).

The presence of multiple interfaces and poorly compacted materials (geometric condition) tend to foster the development of contact erosion. Beguin et al. (2012) state the possibility for leakage to emerge on the levee slope. The granulometric criteria is an essential parameter too since the triggering of the mechanism is related to the grain size difference between the two layers.

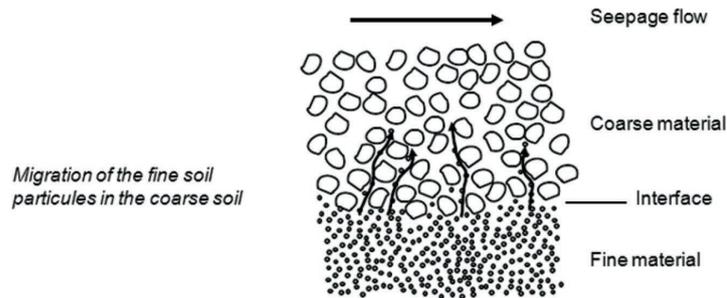


FIGURE I.5 – Principle of contact erosion (Sharp et al., 2013)

### 2.2.6 Suffusion

This fourth internal erosion mechanism consists in the most fine particles' migration within a matrix of coarser particles (Figure I.6). This phenomenon happens in cohesionless soils (Sibille et al., 2015) and tends to increase the medium's permeability without modifying its volume. This process is quite slow but increases with the presence of heterogeneities.

Thus, the presence of heterogeneities as well as leakage (François et al., 2016) can be judged as warning signs for the progress of suffusion. The increase of permeability and decrease of compactness are also alarming. The initiation of suffusion is only made possible under specific granulometric conditions (Kenney and Lau, 1985; Seghir et al., 2014; Wan and Fell, 2004a).



FIGURE I.6 – Principle of suffusion (Sharp et al., 2013)

## 3 Geophysical investigation methods

A geophysical investigation campaign consists in acquiring physical data on the levee structure from the variations of a measured physical field. The acquisitions can be carried out from the surface or with several boreholes techniques (Keys, 2017). Regarding the levee problematic, we can briefly distinguish these acquisition techniques which are either non-intrusive and covering a certain length (surface

techniques), or little intrusive and dedicated to the detailed investigation of more limited areas (drilling techniques). The geophysical information is often interpreted in a complementary way with geotechnical data according to the physical property. In some contexts, quantification of a property can be made requiring that the investigated materials are already known, tested in laboratory, and present little variations through space. Niederleithinger et al. (2012) propose the evaluation of some geophysical methods dedicated to dike investigation.

Most geophysical investigation methods need the resolution of inverse problems (Menke, 2018; Tarantola, 2005). The inversion is a processing method that aims to find the "best" model explaining geophysical measurements performed on the levee. More precisely, various inversion scheme exist based on the meaning of "best", concerning mainly the minimization criterion. In the following sections, a special focus is performed for each method using an inversion procedure.

### 3.1 DC-Electrical Resistivity methods

The 2D-electrical resistivity tomography method (ERT) allows the acquisition of apparent electrical resistivity values with correctly aligned electrodes. These values can then be turned into real electrical resistivities after inversion processes in order to get two dimensional (2D) sections of levees. Electrodes can also be considered in boreholes or in 3D configurations. The inversion processes can thus be made in 2D or in 3D and more information can be found in Loke (2011); Loke et al. (2013); Pidlisecky et al. (2007). However, the 3D configuration is rarely used for levee issues, considering large scale investigation campaigns. 3D configuration is more likely to be used for high resolution studies. The electrical resistivity is expressed in  $[\Omega.m]$ . Even though ERT is commonly used for the investigations of levees, it still has some limitations. Actually, the method can be disturbed by the presence of sheet piling, temperature, rainfall and 3D effects (Besson et al., 2008; Fargier, 2011; François et al., 2016; Keller and Frischknecht, 1966). Topography is not a limitation but transverse topographic variations need to be considered for transverse tomographies. Variations of topography can limit the results interpretation for longitudinal acquisition (Busato et al., 2016; Rucker et al., 2006). Moreover, the ERT needs important resistivity contrasts to work properly. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.2.

The method consists in injecting an electrical current, that can be assimilated to a direct current, with a known intensity in the soil by means of two « current » electrodes. Two other « potential » electrodes are used to measure the electrical potential drop, which is a function of the material's characteristics and distribution. The acquisition can be done as a vertical electrical sounding (to investigate vertical variations of resistivity) or as a continuous resistivity profiling (to investigate lateral variations of resistivity). The combination of these two acquisition modes leads to ERT. The investigation depth and the resolution are function of the spacing of the electrodes, the device's length, the acquisition array (Wenner, Schlumberger...) and the soil's nature (Kearey et al., 2013). The resolution decreases as the depth of inves-

tigation increases. If galvanic contact is difficult to achieve, the capacitive resistivity technique can be used (Kuras, 2002; Kuras et al., 2006). Many more information concerning the ERT method can be found in (Friedman, 2005; Kearey et al., 2013; Keller and Frischknecht, 1966; Loke et al., 2013; Samouëlian et al., 2005; Ward, 1990).

ERT is a preferred method for levee investigation and many studies refer to it (Burns et al., 2006; Chinedu and Ogah, 2013; Fargier et al., 2014; Johansson and Dahlin, 1996; Jones et al., 2014; Lin et al., 2013; Lopes et al., 2012; Royet et al., 2013; Sjö Dahl et al., 2005).

TABLE I.2 – The ERT method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Water content	Decrease of the electrical resistivity when water content increases. Keller and Frischknecht (1966) propose a relation for coarse-grained materials and (Gunn et al., 2015; Kalinski and Kelly, 1993; Schwartz et al., 2008) for clays.
Interfaces	The ability to detect interfaces increases with the resistivity contrast of the two materials involved (Kearey et al., 2013).
Granulometry	The electrical resistivity goes down with the increase of clay content (Giao et al., 2003; Tabbagh et al., 2007; Waxman et al., 1968) and coarse materials imply a higher electrical resistivity (Keller and Frischknecht, 1966). Abu-Hassanein et al. (1996) point out a relation between the particles size and the electrical resistivity for a known water content.
Cracks	Samouëlian et al. (2003) characterize soil cracks at centimetric scale such as Tabbagh et al. (2007). It depends on the cracks size and whether they are filled or not.

TABLE I.2 – The ERT method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Heterogeneities	It depends on the size, depth and resistivity contrast with the surrounding material (Kearey et al., 2013; Samouëlian et al., 2005; Weller et al., 2006).
Man-made pipes	It depends on their nature and on their resistivity contrast with the host material. For metallic pipes, a very low value of apparent resistivity will be measured and the pipes will easily be detected (Liu and Kleiner, 2013). For PVC pipes, the detection is complicated. Vickery and Hobbs (2002) propose a method for removing the effects of subsurface conducting pipes.
Cavities	Interesting for the detection of conductive cavities (filled with clay or water) but not for the empty ones (Fauchard et al., 2004). Is directly function of its size, depth and resistivity contrast with the host material (Chalikakis et al., 2011). (Butler et al., 1994; Gautam et al., 2000).
Compactness	The porosity can be estimated using Archie’s law for saturated rocks (Archie, 1942). Robain et al. (1996) link high electrical resistivity to porosity. Abu-Hassanein et al. (1996) establish that the electrical resistivity decreases when the compactness increases for a constant water content and Beck et al. (2011) propose interpretation of the dry density influence on the resistivity of a fine-grained soil.
Hydraulic permeability	For glacial outwash materials, Kelly (1977) develops an empirical relation. Huntley (1986) suggests a relation between permeability and apparent formation factor (ratio of measured total resistivity to the fluid resistivity) in a granular aquifer (Bolève et al., 2011).

### 3.2 Self potential method

The self-potential (SP) method is a passive electrical method with no current injection. It consists in measuring electrical potential differences, [V], naturally present in the ground. The two main origins of these electrical sources are the electrofiltration potential, linked to the water circulation in a porous medium or in fractures network, and the redox potential. The investigation depth depends on the intensity of the source and on the extension of the measurement (Kearey et al., 2013). The potentials can fluctuate depending on the temperature. The method is very sensitive to anthropogenic noises (man-made pipes, reinforced concrete, electricity network...), to bio electrical potentials (tree roots) and to magnetotelluric phenomena such as storms (François et al., 2016). Ahmed et al. (2013) propose the use of SP2DINV code and detail the inversion of the self-potential data using Tikhonov regularization and weighting depth and smoothness constraints.

The self-potential method is mainly used for the detection of water leakage in levees (Al-Saigh et al., 1994; Bolève, 2009; Bolève et al., 2011; Kang et al., 2014). Additional information about the SP method can be found in Fink et al. (1990) and in Jouniaux et al. (2009). The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.3.

TABLE I.3 – The SP method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Cracks	Can possibly be detected according to their size, orientations and if there is water flow inside (Rozycki et al., 2006).
Man-made pipes	Buried metallic structures are source of redox potentials which can be detected (Castermant et al., 2008; Revil et al., 2001).
Cavities	Chalikakis et al. (2011) point out that cavities can be detected if they are filled with water (Jardani et al., 2006; Vichabian and Morgan, 2002).

TABLE I.3 – The SP method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Flow velocity	Bolève (2009) and Bolève et al. (2009) propose a method for the estimation of flow velocities focused on levee problematic.
Hydraulic permeability	Bolève et al. (2011) suggest a method for the hydraulic permeability estimation of the preferential fluid flow pathway with salt tracer injection.

### 3.3 Induced polarization method

The induced polarization method (IP) can be used in the spectral or time domain (Kaouane, 2016). Used in time domain, it allows the determination of the apparent chargeability [ $\text{mV.V}^{-1}$ ] (Slater and Lesmes, 2002) while used in frequency domain, it allows the determination of the frequency effect (differential polarization effect) and the phase (phase difference between the voltage and the injected current) (Kaouane, 2016). The IP effect stems from a delay in the voltage response of the investigated material (Sumner, 2012). Just as the ERT method, a current is injected by means of two electrodes while potential electrodes measure the electrical potential difference. A high chargeability can indicate the presence of sulfides, oxides, graphite or cation-rich clays (Pflug et al., 1997). It is easier to set up the IP method in the time domain but a specific decision needs to be taken concerning the signal integration windows for the chargeability computation (van Schoor et al., 2009). Furthermore, non polarizable electrodes are required for the potential drop measurements except in limited cases (Leroux et al., 2007), and much care is needed when handling cables in order to avoid electromagnetic coupling. The spectral induced polarization method is complex to implement since the accurate measurement of low frequency signals requires time-consuming acquisitions (Ingham et al., 2014) and because of electromagnetic couplings between the ground and the cables. Research teams are currently working on the signal transformation from the time domain to the spectral one (Ingham et al., 2014). As for the ERT method, the investigation depth increases as the spacing of the electrodes increases (Sarma, 2014). This investigation method is long to set up and the presence of man-made pipes, cables or electric transformers prevents from using it. The intercalation of too resistive or conductive layers can mask the underlying layers. Details of electrical induced-polarization inversion approaches are proposed in Binley and Kemna (2005); Karaoulis et al. (2011).

Kaouane (2016); Kemna et al. (2012) and Sumner (2012) give complete information about the IP method principles. In levee problematic, Mary et al. (2016) and Zanetti et al. (2011) use the IP method to map tree root systems. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.4.

TABLE I.4 – The IP method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Water content	Used in clay-rocks (Ghorbani et al., 2009) and sandstones (Titov et al., 2010). The chargeability tends to decrease when the water content increases but a normalisation is needed. The direct link between chargeability and water content has not been made for embankments.
Interfaces	Interfaces between distinct materials are detectable if the chargeability contrast is enough (Vaudelet et al., 2011).
Granulometry	Revil and Florsch (2010) find out that the granulometry is linked to the distribution of the relaxation times for a polarization of the Stern layer being the dominant mechanism in the integrated frequency window.
Cracks	Is a function of the nature of the surrounding material and the nature and size of the fractures. Schmutz et al. (2011) use the spectral IP method to detect cracks and make a distinction between clay-filled and open fractures.
Heterogeneities	Heterogeneities with an important chargeability contrast with their surrounding materials will be detectable if they are not too deep and large enough (Vaudelet et al., 2011).

TABLE I.4 – The IP method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Man-made pipes	Is sensitive to the presence of metallic materials. Mao et al. (2016) bring to light that it is better to plot the chargeability rather than the normalized one to visualize a metallic pipe. The presence of long metallic structures such as pipes or cables can make the method useless because of the generated noise.
Compactness	Weller et al. (2010) propose a constrained relation between parameters obtained from IP acquisition and pore surface area.
Hydraulic permeability	Revil and Florsch (2010) relate the hydraulic permeability of a granular material to its spectral IP properties (Koch et al., 2012).

### 3.4 Low-frequency near-field electromagnetic induction method (Slingram)

The low-frequency near-field electromagnetic induction (EMI) method is an active method giving information on the field apparent electrical conductivity  $\sigma[S.m^{-1}]$  and on the magnetic susceptibility. The method consists in using vertical and/or horizontal coils in which an alternating current is flowing with a known frequency, inducing a primary magnetic field  $HP$  (McNeill, 1980). The encountering of this magnetic field with a conductive anomaly generates a secondary field  $HS$ . Thanks to a coil, the total field  $HT$  is measured, corresponding to the sum of  $HP$  and  $HS$ . The Slingram method is a specific EMI method with short distance coils (Delefortrie et al., 2014). Under the low induction number approximation (McNeill, 1980), the investigation depth is function of the distance  $s$  between the coils and of the acquisition mode. When the coils are coplanar and horizontal, the investigation depth is about  $s/2$  while when they are vertical, the investigation depth is about  $3s/2$  (Fauchard and Mériaux, 2007). These kinds of methods, when used qualitatively, allow a quick (cost-effective) assessment over the whole levee length (flood protection system). They are often used for preliminary field studies. Nabighian (1991) explains that power lines and cables can cause electromagnetic perturbations in the

Slingram acquisitions and that the temperature changes can cause drift or errors in the in-phase readings such as topographic effects. Thiesson et al. (2017) propose a 3D linear inversion method for the processing of magnetic susceptibility variation data derived from the method of moments. In this work, 1D non-linear inversion scheme is first applied, point by point, to identify the vertical distributions of magnetic susceptibility and electrical conductivity.

Inazaki and Hayashi (2011) use the Slingram method to obtain an apparent electrical conductivity map all around a levee on which they conduct geophysical methods. Sentenac et al. (2017) use the Slingram method all along an earth dam axis to obtain resistivity profiles and characterize anomalies. Tezkan (1999) proposes a review concerning different electromagnetic methods using a magnetic dipole or coils, such as Slingram, or electromagnetic methods using a remote plane-wave source of excitation, such as radio magnetotelluric. The latter is not presented in this paper because does not appear much in the literature about levee investigation. Additional information on the method can be found in Everett (2012); Nabighian (1991) and recent use for hydrogeological studies in Calamita et al. (2015) and in Boaga (2017). The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.5.

TABLE I.5 – The low-frequency near-field EMI method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Water content	The electrical conductivity increases along with water content (Brevik et al., 2006; Hanson and Kaita, 1997; Kachanoski et al., 1990; Khakural et al., 1998).
Interfaces	Can detect vertical conductivity interfaces caused by changes along the levee such as the presence of a zone including a repaired breach (Morris, 2012). Sherlock and McDonnell (2003) use the Slingram method to estimate a water table depth.
Granulometry	Used to delineate clay lenses (Cockx et al., 2007), to estimate depth to claypans (Doolittle et al., 1994) or to map sand deposits (Kitchen et al., 1996).

TABLE I.5 – The low-frequency near-field EMI method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Heterogeneities	Can be detected, especially conductive anomalies but Thiesson et al. (2009) show the ability of the method to detect resistive features in a conductive medium. The method is often used in archaeological problematics to detect a target.
Man-made pipes	Recommended for the buried metallic structure detection (Huiming et al., 1990; Tabbagh and Verron, 1983).
Cavities	Used to characterize the lateral karst extension in rock areas (Vogelsang, 1987). Depends on size, depth and if the cavities are filled or not. Bibliographic references concerning the cavities detection in levee problematic remain sparse (Fauchard et al., 2004).

### 3.5 Ground penetrating radar method

This method is an electromagnetic high frequency method (from 10 MHz to 1 GHz) (Kearey et al., 2013). The ground penetrating radar (GPR) measures a round trip propagation time of the radar wave pulse in the ground and variations of amplitude and phase of this wave. If the medium is globally homogeneous with presence of reflectors, value can be deduced, informing on interfaces depth and other reflectors (François et al., 2016). Di Prinzio et al. (2010) use a 250 MHz central frequency antenna to monitor river embankments and display the values of maximum spatial resolution and penetration depth for some nominal frequency values.

Waves are issued from an antenna and propagate through the ground. When the wave encounters a dielectric permittivity contrast,  $[F.m^{-1}]$ , a part is transmitted and a part is reflected back to the surface and recorded by the radar. The investigation depth depends on the chosen central frequency of the antenna and on the electrical conductivity of the levee materials. The presence of very resistive materials or the use of low frequency allows a deeper investigation depth (with a lower resolution). The depth can vary from 0 m in very conductive materials to 50 m for very low conductivity material (less than  $1 mS.m^{-1}$ ) (Smith and Jol, 1995). While 2D full

waveform inversion of ground penetrating radar data is effective (Lavoue, 2014), the 3D full waveform inversion is still under research (Watson, 2016). For further insight, concerning the method and the data processing as well as the inversion, complementary and complete information are available in Annan (2005); Benedetto and Pajewski (2015); Daniels (2005); Jol (2008); Lai et al. (2018). To take benefits of it, the GPR needs a material with a resistivity value greater than 100  $\Omega.m$  (Bièvre and Maurin, 2002) and with a low water content since it affects the GPR velocities and attenuation (Antoine et al., 2015). The method is disturbed by metallic and/or emitting structures such as power lines, metal walls, radio transmitters...

This investigation method is not often used for levee diagnostic since they are usually too conductive (presence of clays, high water content...) to allow a deep investigation (Fauchard and Mériaux, 2007). However, hereafter are a few works dealing with the GPR method on levees : (Antoine et al., 2015; Carlsten et al., 1995; Johansson and Dahlin, 1996; Marcak and Golebiowski, 2014; Tanajewski and Bakula, 2016). As done in Busato et al. (2016), the GPR is often used in bi-static configuration to improve the highlighting of anomalies and water content differences. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.6.

TABLE I.6 – The GPR method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Water content	For all soils, the apparent permittivity significantly increases with the value of water content (Topp et al., 1980). West et al. (2003) and Kuroda et al. (2009) quantify water content while Huisman et al. (2003) propose a complete review dedicated to the estimation of soil water content (Turesson, 2006).
Interfaces	According to the type of materials, interfaces can be characterized (François et al., 2016). An interface between a sandy material and a subjacent clayey one will for example be striking (Kearey et al., 2013). The detection is eased with a large dielectric contrast.

TABLE I.6 – The GPR method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Cracks	Is sensitive to voids and technically able to detect cracks in the levee materials if they are large enough and depending on the antenna's frequency. Xu et al. (2010) detected cracks in sloping clay core and Grasmueck (1996) uses this method for imaging fractures in gneiss.
Heterogeneities	Is a function of the size, depth, nature of the heterogeneity and of the host material. Biavati et al. (2008) detect repaired areas, construction levels and hidden elements in embankments. However, the detection of pluricentimetric rocks in a fine-grain material seems complex and depends on the investigation depth which is function of the frequency.
Man-made pipes	Metallic pipes and cables can easily be detected (Pettinelli et al., 2009; Royet et al., 2013).
Cavities	Air filled, water filled and clay filled cavities can be detected if there is no clayey cover masking the cavity. Xu et al. (2010) detect voids inside levees. Di Prinzio et al. (2010) and Chlaib et al. (2014) detect small scale burrows of animals.
Compactness	An increase of the soil compactness induces an increase of the dielectric permittivity (Scholte et al., 2002). However, it is very complex to determine precisely the compactness or porosity value. (Araujo et al., 2016; Golebowski, 2010).

### 3.6 Nuclear magnetic resonance (NMR) method

The nuclear magnetic resonance (NMR) method can be used as a laboratory, borehole or field method (Behroozmand et al., 2015). A magnetic field is generated, at a specific frequency, by means of a loop disposed on the levee surface, in order to perturb the equilibrium state of the hydrogen protons composing the water molecules. Once the magnetic field is shut down, the protons come back to their equilibrium state and a magnetic field is induced by the relaxation of the excited protons. This phenomenon is called the NMR response. The NMR response gets more significant as the amount of excited protons gets larger. That is why it can directly be correlated to the water content in the subsoil, to the thickness of the groundwater table and to the hydraulic conductivity (Hertrich, 2008; Legchenko et al., 2002; Yaramanci et al., 1999). The depth of groundwater detection with this method depends on the measurement conditions but an average depth of investigation of about 100 m can be estimated (Legchenko et al., 2002). One of the limiting factors is the electrical conductivity of the studied structure. Indeed, the investigation depth strongly decreases for resistivity values below 10  $\Omega$ .m (Baltassat and Legchenko, 2003) and if the magnetic field intensity is low. A special attention must also be given to all electromagnetic field disturbers such as electrical transformers, high-voltage lines, storms...

Irons et al. (2014) used the NMR method to monitor internal erosion and piping in an earthen embankment. Detailed and complete information are available in Behroozmand et al. (2015); Legchenko et al. (2002); Weichman et al. (2000), as well as reviews of the advances in data processing, forward and inverse modelling and hydrological parameter estimations from NMR method. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.7.

TABLE I.7 – The NMR method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Water content	Especially dedicated to the detection and estimation of water content, even though the discrimination between free and bound water remains complex (Legchenko et al., 2002).

TABLE I.7 – The NMR method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Granulometry	According to the nature of the materials, the relaxation times are different. These are dependent of the pore size and of the surface relaxivities or large magnetic susceptibilities (Behroozmand et al., 2015; Legchenko et al., 2002).
Cavities	A water-filled cavity is detectable whereas an air-filled one is not (Chalikakis et al., 2011).
Compactness	Porosity can be evaluated in a saturated media (Chang et al., 1994; Grunewald and Knight, 2011; Kenyon, 1997; Legchenko et al., 2002).
Hydraulic permeability	Relation exists between the relaxation times and the hydraulic permeability (Kenyon, 1997). For saturated media and if the porosity is well constrained (Chang et al., 1994; Legchenko et al., 2002)).

### 3.7 Seismic refraction tomography method

Seismic refraction and seismic reflection methods can be used to characterize the sub-surface. However, we do not detail the seismic reflection method since it requires specific technologies to be used on a small scale problematic such as levee investigation. The characterization of the first 10 meters could be done with high-resolution seismic reflection method, but it still remains under study.

The seismic refraction method uses P-waves (or S-waves) arrival times to determine the seismic velocities,  $v$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ], of different layers and their associated thicknesses. The equations governing the propagation of these waves are those used in optics (Snell-Descartes principles). A seismic source is generated at various locations and geophones are aligned on the surface, recording the seismic waves arrival times. The body waves are refracted on the interfaces of two layers of different mechanical impedance. With the arrival times, seismic velocities can be determined (Kearey

et al., 2013) and a 2D cross section can be obtained (Dérobert and Abraham, 2000; Hagedoorn, 1959). In order to use this method, the seismic velocities are required increasing with the depth. Many unwanted noise sources (vehicles, wind, storms...) are susceptible to alter the data quality. If a water table is present, the P-waves velocity will be modified and the interpretation will be tougher unless the expert is looking for the groundwater table. The seismic refraction tomography uses the interfaces' depths determined by the seismic refraction method. Its goal is to obtain a clearer image using inversion process. White (1989) proposes a tomographic inversion process for the 2-D velocity structure determination from first-arrival traveltimes while Zelt and Barton (1998) compare two tomographic methods for the determination of 3D velocity structure. In particular, Boschetti et al. (1996) implemented an algorithm to solve the inverse problem with several sets of synthetic seismic refraction data. Sheehan et al. (2005a) also evaluate and compare various methods and available software for seismic refraction tomography analysis.

The investigation depth of the seismic refraction method is function of the nature of the seismic source, the length of the profile and the nature of the investigated materials (Hilbich, 2010). For a source consisting of a hammer and a plate, 10 meters is a rather good investigation depth.

The seismic refraction method has been used for earth dams investigation in Heiland (1940). However, apart from its combined use with geophysical methods (Cardarelli et al., 2014) or to detect the bedrock's top. Its single use remains quite unusual in levee problematic. Detailed information concerning this method can be found in Palmer (1980) and in ASTM (2011a). The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.8.

TABLE I.8 – The seismic tomography method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Water content	Can be used to estimate the groundwater level (Haeni, 1988; Zohdy et al., 1974) but not for the estimation of soil water content.
Interfaces	If the acoustic impedance contrast between two layers is large enough, can determine the depth of such an interface (Bell, 2007; Kearey et al., 2013).

TABLE I.8 – The seismic tomography method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Cavities	Animal burrows can have a very small effect on the data acquisition, but their characterization is almost impossible (Kneibler, 1985). Can detect larger cavities such as karsts. The presence of a layer of high seismic velocity can still be an obstacle to the detection of cavities (Chalikakis et al., 2011; Sheehan et al., 2005b).
Compactness	The P-waves velocity tends to increase with the compactness (Eaton and Watkins, 1967; Yu et al., 2016).

### 3.8 Multi-channel analysis of surface waves (MASW) method

The Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) method was introduced in the late nineties (Park et al., 1999) and (Xia et al., 1999). It consists in studying the surface wave's dispersion (waveform deformation) in order to determine the shear wave's velocity. The array implementation is similar to the one used for the seismic refraction method. About the two-thirds of the seismic energy is transmitted by the surface waves, they are less impacted by the environmental noises (Miller et al., 1999). Park et al. (1999) break down the method into three stages : (a) the data acquisition, (b) the determination of the Rayleigh dispersion curve, and (c) the inversion process with the determination of the shear velocities. These velocities can be constrained during the inversion process using information on the P-waves velocities and the interfaces depth, obtained by the seismic refraction method. The investigation depth is function of the wavelength of the source signal and of the array length, about a quarter of the array length according to Lagabrielle (2007). The investigation depth increases along with the decrease of the source frequency and can go deeper with natural sources. In order to be correctly used, this method requires a flat topography and a horizontally layered medium. An important acoustic impedance contrast between the different media is also needed to be able to distinguish them. The resolution is directly related to the inter-geophone spacing.

Many complementary information about the MASW method are presented in Park et al. (1999, 2007); Socco et al. (2010); Xia (2014); Xia et al. (1999). Surface waves have been used by Karl et al. (2011) in active mode and by Le Feuvre et al. (2015) in passive mode to characterize river or sea levees. Lin et al. (2004) present

the use of MASW for assessing the soil liquefaction potential which can lead to the levee failure. « Although the model used to solve the inverse problem in surface-wave method is always one dimensional » as written in Socco et al. (2010), some authors take into consideration some side effects to improve their 1D model Strobbia and Foti (2006). Bohlen et al. (2004) propose 1.5D model by concatenating 1D model with lateral constraints in the inversion. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.9.

TABLE I.9 – The MASW method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Interfaces	The acoustic impedance contrast must be big enough between two layers (Karl et al., 2008; Lane Jr et al., 2008).
Cracks	Presence of fractures in the subsoil modifies the acquired signal (Chalikakis et al., 2011; Parker Jr and Hawman, 2012) but, to our best knowledge, the size and extension of the cracks cannot be precisely determined.
Heterogeneities	Is a function of their size and nature. If the heterogeneity dimension is below the resolution level, it cannot be detected. Lin and Lin (2007) use the lateral variation of surface waves velocities to detect lateral heterogeneities.
Cavities	Large cavities can be detected (Chalikakis et al., 2011; Nolan et al., 2011), but the MASW method is usually combined with one or more methods. (Debeglia et al., 2006) combine it with microgravimetry to detect karsts in an urban environment. The use of MASW to detect cavities is still under study and remains a tough problem (Bitri et al., 2016). To our best knowledge, animal burrows would not be detected into a fluvial levee.

TABLE I.9 – The MASW method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Compactness	Yu et al. (2016) bring out the effects of porosity on seismic velocities and elastic modulus for solid materials and rocks. The porosity/compactness value of a levee cannot be precisely determined but zones of deconsolidated soils can be detected (Morris, 2012).
Shear strength	The seismic velocities are linked to the dynamic shear and Young’s modulus (Karl et al., 2011). Privileged geophysical method to characterize the shear strength of the levee material.

### 3.9 Acoustic method

The acoustic method is a passive method that consists in recording the pressure variations on hydrophone membrane induced by acoustic waves. These waves are assigned to potential water leakage inside the levee or dam. As for internal erosion processes with water leakage, the grains movement provokes acoustic waves with a frequency from 15 to 20 Hz (Bolève et al., 2012), potentially audible and measurable. François et al. (2016) distinguish two measurement methods : (1) direct leakage estimation by an expert ear or (2) a posteriori data processing after recording the acoustic signal. Many recordings need to be carried out close to the abnormal area in order to determine its extent (Bolève et al., 2012). Rittgers et al. (2014) use geophones instead of hydrophones for acoustic emissions localizing. Koerner et al. (1981) propose a review paper on acoustic emission behavior in soils, having the dam and levee as a case study. This method can be affected by parasitic noises such as storms or rainfall (François et al., 2016).

### 3.10 Micro-gravimetry method

Results of a micro-gravimetry campaign are expressed as gravity field anomalies, named Bouguer gravity anomaly [gals]. This investigation method relies on the study of gravity field variations associated to underground mass anomalies (positive or negative), using a micro-gravimeter. These mass anomalies can be associated to density variations. The smallest significant anomaly that can be measured is about 10  $\mu$ gal according to Yule et al. (1998) and about 20  $\mu$ gal according to Lagabriele (2007). No true investigation depth can be given since the detection of an anomaly

is function of the nature, dimension and depth of the anomaly, except if the hypothesis of a cylindrical anomaly is made. A very deep but large and contrasting anomaly could thus be sensed. However, since the measures are inverted, the extension of the measurements and of the gravimetric investigation has an impact on the investigation depth. Li and Oldenburg (1998) display two methods for the surface gravity data inversion in order to recover a 3-D distribution of density contrast. In this method, measurements need numerous corrections (drifting of device imputed to the change of latitude, luni-solar tide, surrounding reliefs...) detailed in Nowell (1999). Elevation values must be recorded precisely for each point using a digital elevation model. Fauchard et al. (2004) point out the dimension of the measurement mesh : an optimized mesh is essential to get relevant results. The work of Debeglia and Dupont (2002) presents some critical factors for microgravity investigations.

The micro-gravimetry method is not often used for levee problematic. However, Blížkovský (1979); Butler (1980); Kearey et al. (2013) and Torge (1979) provide additional general information about gravity surveying. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.10.

TABLE I.10 – The micro-gravimetry method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Heterogeneities	Positive (higher density) or negative (lower density) anomalies are detected if the density contrasts are high enough (Butler, 1980).
Cavities	Historically adapted method. Many works have been carried out concerning the detection of cavities in karst areas (Butler, 1984; Styles et al., 2005). Empty cavities are easier to detect than the filled ones (Chalikakis et al., 2011). Depends of the size, density contrast and depth.
Compactness	Tuckwell et al. (2008) use this method to characterize low-density ground.

### 3.11 Temperature based method

The infrared (IR) thermography method can estimate the temperature of a targeted object from its IR emission intensity, using an IR camera (Gaussorgues, 1999). The measurement precision is around a tenth of a Celsius degree (François et al., 2016). Unfortunately, this method cannot provide information on the internal levee structure since the maximum investigation depth is about a few centimeters. It is necessary to choose the correct time to do the investigation in order to have a correct lighting without shadow. Measurements cannot be done under rainy conditions or a too sunny weather. Vegetation density has to be very limited (Armbruster et al., 1989) and it shall be ensured that there are no warm bodies around likely to generate radiation interference (pylons, concrete walls...) (Mériaux et al., 2000).

The temperature contrast on the surface of a levee allows the detection of water leakage (Armbruster et al., 1989; Huang et al., 2010). The IR thermography investigation method can be done on foot, by car, plane, helicopter or even with drones (Miquel et al., 2016). Intrusive methods based on temperature acquisitions are also used for levee assessment. Dornstädter and Heinemann (2012) for example, use temperature probes and fibre optic temperature sensing for levee monitoring, detecting water flows inside the structure. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.11.

TABLE I.11 – The IR thermography method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Water content	Deitchman and Loheide (2009) bring to light the limit between saturated and non-saturated areas on sides of a drainage ditch. They were able to monitor the groundwater discharge process and distinguish different discharge rates. Grinzato et al. (2011) study the water content of buildings' walls.
Cavities	Can be useful for detecting animal burrows, only if they are inhabited (Boonstra et al., 1994). But it does not provide information concerning the galleries' extension. Fauchard et al. (2004) explain that the airborne method can inform on the presence of potentially large cavities, but does not seem relevant for application to levees.

TABLE I.11 – The IR thermography method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Flow velocity	Deitchman and Loheide (2009) are able to establish a qualitative link between temperature and hydraulic permeability at leakage position.

## 4 Geotechnical investigation methods

The objective of a geotechnical investigation campaign is to provide punctual information on the levee structure, informing on the presence of interfaces and anomalies. These information can then be used to calibrate the geophysical data and to improve the characterization of the levee, informing on the mechanical properties of the different layers. Thanks to these geotechnical methods, geotechnical models of levees can be generated and then used to model scenarii of rupture. These investigation methods can be divided into two categories : (a) laboratory testing on soil sample and (b) in-situ testing. Concerning the detection of cavities and man-made pipes, obviously all in-situ testing are able to determine their presence if the borehole has been done through, if not, no relation can be made.

### 4.1 Laboratory testing on soil samples

The material extractions allow the identification of the soil and the understanding of its mechanical behavior as well as the lithology determination. The extraction can be made by using an auger or by coring. Laboratory testing have the benefit to provide very accurate information, however they do not study the in-situ sample and consequently some environmental parameters are not taken into account. That is why it is important to carry out laboratory testing to characterize a soil even if the measured parameters can differ from the in-situ ones. The article focuses on in-situ methods, explaining why we will not detail them. Moreover, these methods exclusively characterize one soil property. A non-exhaustive list of laboratory testing techniques usually used for levee investigation is proposed below.

Identification tests :

- Atterberg limits (plasticity indexes, clay content) (ASTM, 2017c)
- Methylene blue test (clay content) (ASTM, 2014)
- particle size analysis (ASTM, 2017d)
- Sedimentation size analysis (particle size below 75  $\mu\text{m}$ ) (ASTM, 2017b)

- Void ratio test (relative density) (ASTM, 2017a)
- Water content test (ASTM, 2010)

Mechanical characterization tests :

- Compaction test (Proctor) (ASTM, 2012)
- Unconfined Compressive Strength test (ASTM, 2016)
- Hydraulic permeability test with a permeameter under constant or variable applied load (ASTM, 2015b)
- Oedometer test (soil's consolidation properties) (ISO, 2017b)
- Shear test (Casagrande shear box test) (ISO, 2017a)
- Triaxial compression test (ASTM, 2011b)
- Hole Erosion Test (critical shear stress value and coefficient of erosion) (Fattahi et al., 2017)
- Jet Erosion Test (Marot et al., 2011)

## 4.2 Drilling parameters recordings

When a geotechnical survey is executed, many parameters are recorded in order to characterize the levee mechanical properties and to take advantage of the executed borehole. The drilling rig can drill through the levee with an established depth and diameter. While drilling, the device is cooled by a drilling fluid. According to Cailleux (1986) and then updated Reiffsteck (2010) and François et al. (2016), the drilling parameters can be classified into four categories :

- parameters imposed by the device and the method, unrelated to the acquired data (device dimensions, fluid injection, drilling rig limits) ;
- instrument parameters fixed by the user (thrust applied on the device, rotational speed, fluid flow) ;
- parameters related to the environment (rotational couple, injection pressure, progress speed, fluid flow return) ;
- independent evolving parameters (modification of the fluid composition, deterioration of the device).

In order to have correct drilling parameters, it is necessary to maintain constant the thrust applied on the device, the injection flow, the rotational speed (Reiffsteck, 2010). Corrections also need to be made in order to take into account the deterioration of the device and the modification of the fluid composition. Riechers (2012) presents the impact of drilling in embankment dams, in particular the associated risks. Complementary information about the drilling parameters recordings can be found in Gui et al. (2002); Pfister (1985); Reiffsteck et al. (2012).

Girard et al. (1986) and Reiffsteck (2010) point out the relations between the drilling parameters and the soils characteristics. Different media can present equivalent drilling parameters. Reiffsteck et al. (2012) present the example of heterogeneous

soils with coarse grains : the thrust applied on the device and the rotational couple decrease considerably with the presence of water since the coarse grains are lubricated and rejected by the drill. That is why it is necessary to combine the drilling parameters with other data in order to constrain the levee model. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.12.

TABLE I.12 – The drilling parameters recordings ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Water content	To our best knowledge, the water content cannot be determined even though the amount of water affects the method values since it has an impact on the soil plasticity.
Interfaces	If the contrast of nature between two formations is strong, interfaces can be detected. Duchamp (1988) proposes the use of a complementary method using the entropy to enhance the interface detection. François et al. (2016) point out the use of drilling parameters to inform on the water table level.
Granulometry	Relative information can be obtained by comparing drilling parameters of different materials. The fluid injection pressure is related to the amount of fines (Reiffsteck et al., 2012).
Compactness	The progress speed is directly related to the mechanical resistance of the penetrated formation. It is therefore possible for two media of same composition, to establish which one is more compacted. The effective thrust also differs according to the stiffness of the penetrated medium. The Soil Rock Sounding relation can as well be used to characterize the compactness of the soil : it is similar to the penetration resistance (Möller et al., 2004).

TABLE I.12 – The drilling parameters recordings ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Hydraulic permeability	With the correct shape factor (below or over the water table), the relative hydraulic permeability can be estimated according to the variations of the fluid injection flow on the adjusted injection pressure (Reiffsteck et al., 2012).
Shear strength	The rotational couple can be associated to a shear test with the effective thrust being the vertical stress (Reiffsteck et al., 2012). However Gui et al. (2002) show poor correlation between the undrained shear strength and the recorded drilling parameters.

### 4.3 Cone penetrometer test

The cone penetrometer test (CPT) consists in pushing rods into the soil, at a constant speed, with a conical tip at the end (ISO, 2012a). Different tip geometries exist. This test is often used for the determination of the soils mechanical resistance properties. A piezocone can be added to the rod, giving information about the interstitial pressure  $u$  [kPa], the test is then named CPTu. The two measured parameters are the tip resistance  $q_c$  [MPa] and sleeve friction  $f_s$  [MPa]. Thanks to these parameters variations, the different subsoil media are distinguishable. Robertson (1990) proposes a soil classification relying on the measured CPT parameters. This classification is widely used in civil engineering. An update of this classification has been proposed in Robertson (2016). Concerning its limitations, the method is not workable in the presence of stones (pluridecimetrics). Furthermore, it needs a heavy truck and a roadway which is why it can only be used on the levee crest. The drill pipe inclination also needs to be taken into account and the test needs to be calibrated with other tests.

Additional information concerning the CPT and CPTu tests can be found in Lunne et al. (1997), in the dedicated standard (ISO, 2012a), in Robertson and Cabal (2015) and in Ameratunga et al. (2016). For levee investigation, the CPT method is usually not used alone but combined with other methods (Bélanger et al., 2010). The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.13.

TABLE I.13 – The CPT method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Water content	The combined use of time-domain reflectometry (TDR) water content probe and CPT test shows that the modification of water content modifies both the tip resistance and the sleeve friction (Vaz et al., 2001; Zawadzki and Bajda, 2016). Though, the impact of the water content seems to be a function of the material, consequently, it still remains difficult to evaluate the exact water content.
Interfaces	Easier to detect given that the contrast between the materials is strong (interface between clays and sands). The different sets of materials are quite easy to distinguish, Hegazy and Mayne (2002) propose the use of the cluster method in order to characterize them using data from the piezocone (CPTu).
Granulometry	Assuming a stone-free homogeneous medium, one can use Robertson’s soil classification (Robertson, 1990, 2016).
Heterogeneities	Is able to characterize the vertical variations of stiffness and tip resistance.
Compactness	Tip resistance is directly related to the density and compactness of the penetrated material (Baghdad et al., 1993).

TABLE I.13 – The CPT method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Hydraulic permeability	Can only be estimated with a CPTu, for a saturated medium, thanks to the interstitial pressure values. Van Baars and Van De Graaf (2007) propose the estimation of compressible soils' hydraulic permeability using a piezocone. Robertson and Cabal (2010) propose a permeability estimation using the Soil Behaviour Type (SBT).
Shear strength	Can be obtained from the tip resistance and constrained with the interstitial pressure (CPTu). It has been experimented for clays by Konrad and Law (1987) and Rémai (2013).

#### 4.4 Field vane shear test

The field vane shear test consists in imposing an in situ shear constraint in order to characterize the undrained shear strength ( $S_u$ ) of the material. This test is described in ASTM (2015a). A vane composed of 4 perpendicular plates is pressed into the ground. Once the vane is at the chosen depth, a torque is applied and the modification of the torsional moment [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ] is measured thanks to a torque-meter. These values can then be linked to the undrained shear strength  $S_u$  [kPa]. To do so, correction factors need to be taken into account, associated to the plasticity index and to the soil's state of consolidation (Bjerrum, 1972). Different correction factors have been proposed (Chandler, 1988; Morris and Williams, 1994). This test is acknowledged for its robustness, simplicity and quick implementation (Ameratunga et al., 2016). It is the recommended test to estimate a short-term embankment stability. This test is not adapted for all materials. It cannot be used within soils with undrained strengths below 200 kPa, neither in high permeability soils such as sands or gravels. Furthermore, intervals of 0.5 m minimum vertical depth are necessary between two subsequent acquisitions (ASTM, 2015a).

Description of the method and associated physical relations can be found in ASTM (2015a) and in Ameratunga et al. (2016). Azzouz et al. (1983); Bjerrum (1972); Jamiolkowski (1985) and Larsson (1980) are devoted to the use of the field

vane shear test in embankments. This method is mostly used on terrains on which a levee is to be built. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.14.

TABLE I.14 – The field vane shear test method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Interfaces	Is unable to characterize interfaces since an acquisition can only be made each 0.5 m. However, it can distinguish two media with different shear strengths (Roy and Leblanc, 1988).
Heterogeneities	A weakened zone can be detected if the shear strength is lower than in the surrounding material.
Compactness	The undrained shear strength informs on the plasticity index of the soil and thus on the state of cohesion. Ameratunga et al. (2016) propose relations between undrained shear strength and plasticity index for normally consolidated soils and over consolidated soils. However, to characterize compactness of a medium from its shear strength, the material needs to be known beforehand.
Shear strength	Best in situ method to characterize the shear strength of a medium, considering its limitations, as stated above.

#### 4.5 Pressuremeter test

The test is described in ISO (2012b). To be executed, a pre-drilling first needs to be made. It consists of a cylindrical probe lowered in the borehole. An increasing pressure is applied on the probe that in turn applies a stress on the walls' borehole, the radial deformation is then measured (François et al., 2016). The relation between the applied pressure and the measured deformation allows the characterization of the soil mechanical properties. A stress-strain curve can be established, it can lead to the characterization of three parameters (Cassan, 2005) :

- the pressiometric modulus ( $E_M$ ) defines the soil pseudo-elastic comporment ;
- the pressure limit ( $P_{LM}$ ) corresponds to the soil rupture stress ;
- the creep pressure ( $P_f$ ) is the boundary between the pseudo-elastic and the plastic state.

The pressiometric curve involves the angle of friction that can then be deduced (Monnet, 2012a,b). The limits of the method concern the execution time and the fact that the pressiometric modulus is not an intrinsic mechanical characteristic of the soil. The admissible stress and the settlement foundation are not estimated precisely (Monnet and Khlif, 1994). This method can only be used with a vertical spacing of at least one meter (François et al., 2016) and the vertical stress remains constant.

The detailed methodology can be found for sands (Hughes et al., 1977; Jewell et al., 1980), granular soils (Monnet, 2012a,b) and clays (Thevanayagam et al., 1994). Cassan (2005) and Mair and Wood (2013) also propose a state of art concerning this method. The pressuremeter is very rarely applied to levee investigation. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.15.

TABLE I.15 – The pressuremeter method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Granulometry	The fraction $P_{LM}/P_f$ and $E_M/P_{LM}$ (known as the rheological factor $\alpha$ ) can be related to the grain size (Cassan, 2005; Fawaz et al., 2014).
Heterogeneities	By comparing different acquisitions, it is possible to determine if the medium is heterogeneous or not. However, characterizing precisely one or more heterogeneities is not practicable.
Compactness	Can inform on the relative stiffness of the different layers (Fahey, 2005). It can also be related to the tip resistance by the relation $P_{LM} \leq 0.3 q_c$ (Lepetit, 2002).

TABLE I.15 – The pressuremeter method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Hydraulic permeability	Estimation from the pressuremeter curve have been published for clayey materials (Zentar, 1999) and (Rangard et al., 2003) but they concern only pressuremeter equipped with an interstitial pressure sensor and for specific range of permeability.
Shear strength	Determines the shear modulus from the slope of the pressure-expansion curve (Mair and Wood, 2013).

## 4.6 Hydraulic permeability tests

### 4.6.1 Lefranc test

The Lefranc test (Lefranc, 1936, 1937) is a field hydraulic permeability test in borehole for aquifers, which has known many modifications since its first use. To be used, this test needs a borehole with an open cavity at the end of it or with a double packer system. Whether a water injection or water pumping, with a constant flow, is used to produce a hydraulic head difference between the borehole and the groundwater table. This hydraulic head difference generates the measured water flow on which will be deduced the hydraulic permeability value. Hvorslev (1951) proposes the calculation of the hydraulic permeability according to the shape factor function of the shape of the cavity. Since then, many additional relations came to characterize that shape factor (Chapuis, 1989). The Nasberg test is a variant from the Lefranc test; it allows the determination of hydraulic permeability in non-saturated media (Nasberg, 1951). The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.16.

Concerning its drawbacks, this test can only be used for permeable media with a hydraulic permeability above  $10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$  (Cassan, 2005) and the water table level must be known. The quality of the acquisition depends on the quality of the realization of the cavity. Furthermore, the investigation radius around the cavity is about 5 meters long, which is why it is relevant to use this method at different locations in order to establish an average permeability.

TABLE I.16 – The Lefranc test method ability to characterize levee properties and characteristics.

Levee properties and characteristics	Characterization ability
Granulometry	There is a direct link between the hydraulic permeability of a medium and its grain size. Hazen (1893) first proposes an empirical relation between the permeability and the grain size (D10) for isogranular sandy soils and for $D_{60}/D_{10} < 2$ . Many other relations were proposed since (Alyamani and Şen, 1993; Carman, 1956; Rawls and Brakensiek, 1989), each one with their imprecisions and limitations. More generally, a high permeability is associated to a coarse grain medium while a low permeability is associated to fine materials such as clays.
Hydraulic permeability	Can be determined, even though the method provides an average value with an investigation radius of 5 meters. Consequently, it gives a mean local hydraulic permeability value.

#### 4.6.2 Permeafor test

The objective of the Permeafor (Ursat, 1992) is to perform a well logging permeability thanks to the hammering of a tip specifically known. This method has exclusively been used in France. The benefit of this method is to allow the detection of vertical variations of permeability. The vertical resolution is fixed by the operator (10 to 50 cm). This test does not require to perform a pre-drilling contrary to the Lefranc test and the use of a packer. The measurement is fast and the results exploitation is automated. A percussion drill rig is required to drive the device into the soil. The permeability measurements are then performed for chosen depths (usually each 20 cm) by imposing a constant hydraulic load for a duration that is fixed by the user (Fargier et al., 2013). The flow of injected water is known and the progressive insertion of the Permeafor's tip informs on the compactness of the penetrated medium. One of the Permeafor's limitation is its range of use, indeed it can only inform on the soil permeability for an hydraulic permeability lying between  $10^{-3}$  and  $10^{-7}$  m.s<sup>-1</sup> (Fargier et al., 2013). The radius of influence is about a few centimeters around the strainer, which is much less than the one for the Lefranc test.

Larrabee (2010); Reiffsteck et al. (2009) describe in a more exhaustive way the modus operandi of the device while Bièvre et al. (2017) and Fargier et al. (2013) show the benefit of using such a device for the assessment of levees. The method capability to characterize levee properties is presented in Table I.17.

TABLE I.17 – The Permeafor test method ability to characterize levee properties and characteristics.

<b>Levee properties and characteristics</b>	<b>Characterization ability</b>
Interfaces	The interface between two different layers can be approximately established (Bièvre et al., 2017) from a change of hydraulic permeability and/or resistance to penetration.
Granulometry	The relation between grain size and the hydraulic permeability measured with the Permeafor are the same as the ones explained in the Lefranc test part.
Heterogeneities	If a stiff heterogeneity is encountered, the Permeafor will be able to detect it thanks to the change in the penetration resistance value (Fargier et al., 2013).
Compactness	The penetration resistance given by the Permeafor's tip can inform the user on the compactness of a layer relatively to another if the material is known (Bièvre et al., 2017).
Hydraulic permeability	Its estimation is the main function of the device (Fargier et al., 2013; Larrabee, 2010; Reiffsteck et al., 2009). However, it has some limitations, as explained above (range of use, clogging risk...).

## 5 Discussion

This work presents on a same level the use of geophysical and geotechnical methods for the assessment of levee properties and characteristics. However, the use

of certain methods does not preclude the indispensable preliminary examination of the levee (visual inspection, historical research, topographical survey, morphodynamic, geological and hydrological study). Furthermore, instead of considering them separately, the geophysical and geotechnical methods are treated equally in order to suggest their joint use. The adequacies of the presented geophysical and geotechnical methods to characterize levee physical properties or characteristics, thanks to the literature given in the precedent sections, are respectively summed up in Table I.18. As has been mentioned already, concerning the detection of cavities or man-made pipes, all in-situ testing are able to determine their presence if the borehole has been done through, if not, no relation can be made.

Many studies already integrate several geophysical and/or geotechnical methods to characterize the subsoil. Concerning the geophysical methods, the ERT is a privileged one and often employed with other geophysical methods (Inazaki and Sakamoto, 2005; Turesson, 2006) or for joint inversion with seismic data (Gallardo and Meju, 2003, 2004; Karaoulis et al., 2012; Saunders et al., 2005) or SP data (Song et al., 2005; Tsourlos and Ogilvy, 1999) for example. However, geophysical investigations do not necessarily include ERT and can combine specific methods according to the purpose of the study : SP and acoustic methods for leakage localizing (Bolève et al., 2012) or MASW and microgravimetry methods for karst detection (Debeglia et al., 2006) as examples. Jardani et al. (2007) use joint inversion of SP and conductivity values to detect the preferential infiltration pathways in sinkholes while Cygal et al. (2016) use this technique with seismic and gravity data in a geological characterization problematic. Concerning the geotechnical methods, the CPT is a common technique often combined with at least the ERT method (Alvin et al., 2016; Sudha et al., 2009) or more methods such as the GPR (Bélanger et al., 2010) or seismic data (Shan et al., 2014). Finally, some authors combine as much information as possible from several geophysical and geotechnical methods to characterize an environment : Cosenza et al. (2006) for example simultaneously use the dynamic penetrometer, the vane shear test, ERT, GPR and seismic refraction while Giao et al. (2008) use drilling parameter recordings, cone penetrometer, field vane shear test, laboratory results and resistivity data.

This work brings to light the lack of references concerning the use of the IP method, micro gravimetry, NMR, pressuremeter and permeability methods for levee problematic. This review spotlights the advantages of these methods for characterizing particular levee properties and suggests their use for levee issues, according to their respective limitations. Furthermore, we highlight the fact that some additional studies need to be made concerning relations between some physical properties and the measured physical parameters. Indeed, some relations have been proposed that either still confined to laboratory experiments (Ghorbani et al., 2009; Giao et al., 2003) or are made for solid materials and rocks (Titov et al., 2010; Yu et al., 2016). From a practical point of view, the fact that the methods are not necessarily made available for the levee managers must be emphasized (e.g., Permeafor).

It also must be taken into consideration that the different described methods are

more or less popular for characterizing one or more levee physical property or characteristic. For example, the ERT and CPT methods are commonly used for survey campaigns while the Permeafor use is still unusual. This popularity influences the ability to execute a specific method. It is often function of multiple questions such as : what feedback from previous experiences do we have? For how long the method has been used to quantify such property? Is it cost-effective? Is such equipment available in the country where the study takes place? Even though these are essential questions, we have not been able to classify the properties' characterization popularity according to the executed method with enough reliable references. The cost, required time, and the instrumentation availability have neither detailed here since these topics are very variable according to the country and location of the levee. The list of the detailed methods is not exhaustive and the laboratory and in-situ tests meet national standards.

TABLE I.18 – Ability for geophysical and geotechnical methods to characterize a levee physical property or characteristic in most appropriate conditions given the literature used in this work. +++ corresponds to a strong relation between a parameter and a levee property, ++ corresponds to a reasonably good estimation of a property, + is associated to the existence of a very restricted sensitivity or to a method little employed or still under study while 0 means that the method is unable to characterize the property or that there is a lack of information in the browsed literature. Crosses in brackets are here to symbolize the lack of application of a specific method for characterizing a specific property on levees. Such symbols highlight the unexplored potentials for levee application.

Geophysical and geotechnical method	Water content	Interfaces	Granulometry	Cracks	Heterogeneities	Man-made pipes	Cavities	Compactness	Hydraulic permeability	Shear strength	Flow velocity
Geophysical method	ERT	+++	++	+	+++	+++	+++	++	+	0	0
	SP	0	0	+	0	+(+)	+(+)	0	+	0	++(+)
	IP	+	++(+)	+	+++	+++	0	+	++	0	0
	Slingram	++	++(+)	0	+++	+++	+	0	0	0	0
	GPR	++	+++	0	++	+++	+++	+	0	0	0
	NMR	+++	(+)	+(+)	0	0	(+++)	++	++	0	0
	Seismic refraction tomography	+	+++	0	0	0	+	++	0	0	0
	MASW	0	++	0	(++)	0	(++)	(++)	0	+++	0
	Acoustic	+	0	0	0	0	0	0	0	0	(+)
	Micro-gravimetry	0	0	0	0	+	0	+++	+	0	0
IR thermography	+	0	0	(+)	0	0	+	0	0	+	
Geotechnical method	Drilling parameters recordings	+	+++	0	+			++	+	+	0
	CPT	+	+++	0	++			+++	++	++	0
	Field Vane Shear Test	0	+	0	+			++	0	+++	0
	Pressuremeter	0	0	++	+			++	+	++	0
	Lefranc test	0	0	++	0			0	+++	0	0
	Permeafor	0	++	++	+			++	+++	0	0

## 6 Conclusion

In this paper, we highlighted the relations between pathologies and existing fluvial levee failure mechanisms. These pathological physical properties or characteristics can be assessed thanks to different investigation methods during a survey campaign. We presented the most commonly used geophysical and geotechnical methods and detailed their abilities to inform on each potential fluvial levee pathology under specific conditions. This work placed on an equal footing these two types of methods in order (a) to assist agencies and levee managers for selecting investigation methods thanks to the proposed sum up tables and (b) to interest the research community with the large quantity of bibliographic references proposed. It appears that ERT and CPT, a geophysical and a geotechnical method respectively, are the most likely to inform on a large number of levee properties. Conversely, more unusual methods, such as NMR or Permeafor, can inform more precisely on fewer but more specific properties. For each method, we pointed out their respective limitations and the potential lack of information or lack of application on fluvial levees.

In Dezert et al. (2017), we introduce a new database framework for levee investigation, considering on an equal footing geophysical and geotechnical investigation methods in order to assist the agencies and levee managers in selecting the most relevant methods for the levees' characterization. For this to be possible, we are taking into account the environmental constraints, the pathologies and the failure modes of the levees. This work insists on the benefits of such a structure to propose new method investigation combinations and to provide a significant quantity of references for the research community. In the future, it would make sense to look for pertinent combination of information methods in order to take maximum advantage of both geotechnical and geophysical data. These combination methods would have to take into account the specificities of each kind of data (different natures, associated uncertainties, spatial distributions) in order to propose the best possible levee diagnosis.

In the next part of this chapter, we will precisely focus on combination information methods and introduce them. The aim being to be able to select one in order to propose a geophysical and geotechnical information fusion methodology for levee characterisation.

# Partie B

## Etat de l'art sur les modèles de combinaison et de fusion de l'information

### 1 Introduction

Nous avons vu dans la partie précédente, l'intérêt d'utiliser plusieurs méthodes de reconnaissance lors d'une campagne sur ouvrage hydraulique. En effet, ces méthodes sont complémentaires et permettent de caractériser différentes propriétés de l'ouvrage susceptibles d'être pathologiques et de mener, à terme, à la rupture de celui-ci. Un des points cruciaux consiste à savoir comment optimiser l'utilisation des données acquises par ces différentes sources. En effet, les informations peuvent correspondre à différentes propriétés (différents paramètres physiques enregistrés) associées à des imperfections de différentes natures (imprécisions, incertitudes, incomplétudes, inconsistances) et distribuées différemment dans l'espace d'investigation. Classiquement, les informations géophysiques et géotechniques sont la plupart du temps simplement superposées (Da Fonseca et al., 2006; Sauvin et al., 2013; Shaaban et al., 2013; Solberg et al., 2012). Dans ce travail de thèse, nous souhaitons proposer un résultat reposant sur une méthodologie capable de tirer profit des spécificités de chaque méthode tout en étant capable d'associer une valeur ou un indice de fiabilité aux résultats proposés. Nous faisons le choix d'axer ce travail de recherche sur des modèles de combinaison de l'information, également parfois appelées **méthodes de fusion**, et **d'écarter les méthodes géostatistiques** plus communes qui peuvent cependant proposer des résultats intéressants (Christensen et al., 2015; Kim et al., 2018).

Plusieurs définitions ont été données à la fusion d'informations et nous retiendrons celle donnée par Bloch (2003) : « la fusion d'informations consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision ». Afin d'illustrer une telle notion, Martin (2005) propose une représentation de l'architecture d'un processus de fusion (Figure I.7) avec en sortie, des facteurs de qualité associés aux résultats. Dans une telle représentation, les connaissances extérieures permettent de choisir la meilleure modélisation possible pour réaliser l'opération de fusion. Les résultats acquis par la fusion permettent d'apporter des connaissances supplémentaires à un expert qui pourra juger nécessaire de réaliser un nouveau processus de fusion, en ajoutant des informations additionnelles.

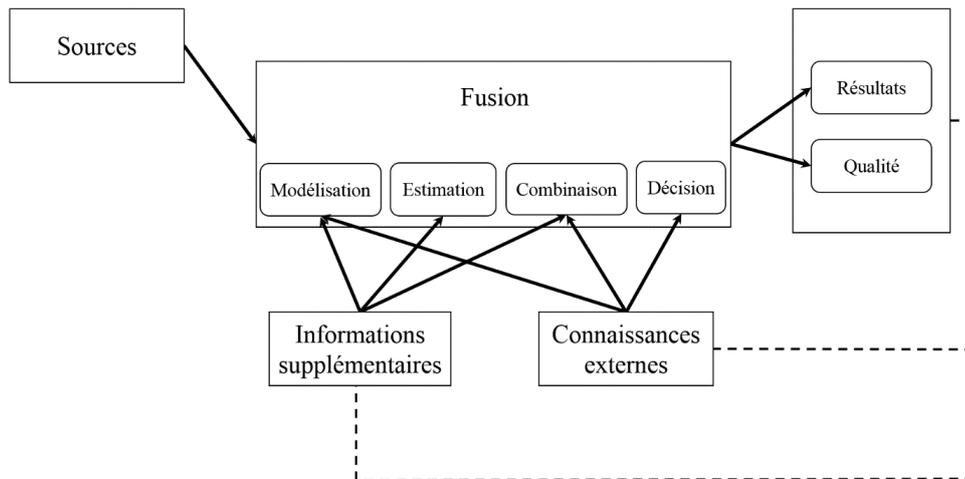


FIGURE I.7 – Représentation de la fusion, modifiée d’après Martin (2005).

Un processus de fusion se décompose en 4 étapes : le **modélisation**, l’**estimation**, la **combinaison** et la **décision**. La modélisation correspond à la représentation des informations à fusionner (ex : distributions de probabilités). L’estimation est à associer à une estimation de cette représentation (ex : estimation des distributions de probabilités). La combinaison correspond à l’utilisation du bon opérateur de fusion pour combiner les informations acquises par les différentes sources. La décision correspond finalement au choix des résultats proposés par la combinaison qui pourront être utilisés en sortie de fusion, associés à des indices de qualité.

Dans cette **Partie B**, nous traiterons d’abord de la qualité de l’information et des formes d’imperfections pouvant être rencontrées afin de distinguer les termes d’imperfection, incertitude, incomplétude, imprécision et inconsistance dans la suite de ce travail. Nous chercherons ensuite à identifier un modèle de combinaison, qui pourrait être mise en place dans le cadre d’une méthodologie de fusion et de propagation des incertitudes, tenant compte des spécificités des informations issues de chaque source (propriétés physiques et imperfections différentes) et de leurs distributions spatiales propres. Afin de sélectionner le modèle de combinaison le plus pertinent, il faut rappeler ici l’objectif de ce travail de thèse : la combinaison des informations (données physiques issues des campagnes de reconnaissance) pour obtenir une représentation de la section de sous-sol, sous forme de distribution des matériaux géologiques (avec la position des interfaces), la présence éventuelle d’anomalies et un indice de confiance associé à ces résultats.

Nous choisissons de suivre un découpage en trois axes, proposé par Van Der Meij et al. (2012), pour présenter plusieurs méthodes et cadres théoriques permettant le traitement et la combinaison d’informations imparfaites issues de plusieurs sources. En effet, Van Der Meij et al. (2012), dans le cadre du projet de recherche européen FloodProBE (Van Ree et al., 2011), en accord avec la Figure I.7, considèrent trois phases durant le processus d’évaluation d’un OHT (ouvrage hydraulique en terre), pour lesquelles des méthodes de fusion d’informations peuvent être utilisées :

- pour améliorer la donnée en entrée,
- pour améliorer le modèle de combinaison employé,
- pour ajuster les résultats en sortie en se basant sur des informations supplémentaires et/ou avis d'experts.

## 2 Qualité de l'information et formes d'imperfection

La qualité des informations, issues de campagnes de reconnaissance sur OHT ou d'autres pratiques expérimentales, est toujours sujette à discussion et perfectible. Il est du devoir de l'expert humain d'avoir ces imperfections en tête lors du traitement des données, afin de pouvoir estimer la fiabilité des résultats proposés, aboutissant la plupart du temps sur une prise de décision (arrêt ou poursuite des investigations, aménagement de l'ouvrage, arrêt de circulation sur la chaussée...). Les approches de fusion d'informations cherchent précisément à modéliser ces imperfections (Martin, 2005).

Le terme général d'« incertitude » est souvent employé dans le langage courant pour regrouper toutes les formes d'imperfection, décrivant les notions de quantité et de qualité des données, et doit donc être remplacé par le terme d' « imperfection » (Bouchon-Meunier, 1995; Dubois and Prade, 2006; Smets, 1991, 1997a). Bien qu'aucune terminologie ne soit reconnue au niveau mondial, comme le fait Tacnet (2009), nous retenons la terminologie de Smets (1997a) en dissociant **l'incertitude**, **l'imprécision**, **l'incomplétude** et **l'inconsistance** de l'information.

Nous présentons ici ces quatre formes d'imperfection, associées à des exemples concrets, permettant de saisir les nuances les distinguant. Une telle caractérisation nous permettra d'utiliser une terminologie définie pour la présentation des modèles de combinaison à suivre.

### 2.1 Incomplétude

L'incomplétude correspond à un manque d'information ou à une absence de données issues de l'une des sources d'information. Martin (2005) distingue l'incomplétude imputée à un défaut d'information (manque d'information qu'une source est supposée fournir) de l'incomplétude imputée à un défaut de modélisation (incapacité de la source à fournir l'information).

Exemple 1 : *Entre deux essais carottés, l'information est manquante puisqu'aucune investigation n'a été réalisée → incomplétude imputée à un défaut d'information.*

Exemple 2 : *La cohésion de certains échantillons de la carotte prélevée ne permet pas de réaliser des essais de mécanique des sols → incomplétude au sein de la carotte, imputée à un défaut de modélisation.*

## 2.2 Imprécision

L'imprécision est fonction de la nature de l'information ou de la source, et quantifie un défaut de connaissance (Martin, 2005). La description de la connaissance peut être jugée imprécise parce que les valeurs associées sont mal définies ou car les qualificatifs employés sont trop vagues : « environ », « à peu près », « dans l'intervalle », « compris entre », « approximativement » (Vuillet, 2012). L'imprécision peut, entre autres, être associée à l'erreur directement imputable à l'étape de mesure.

Exemple : *La masse volumique de ce matériau est comprise entre 1 500 et 3 000 kg.m<sup>-3</sup> → cette information est très imprécise.*

## 2.3 Incertitude

Smets (1997a) qualifie l'incertitude comme un niveau de confiance associé au fait que l'information proposée soit vraie. Elle permet de quantifier le niveau de conformité d'une information à la réalité (Martin, 2005) et donc le niveau d'ignorance (partiel ou complet) de la réalité. L'incertitude peut être décrite de deux manières (Helton, 1997), stochastique (aussi appelée objective) ou épistémique (aussi appelée subjective). L'incertitude stochastique est employée pour la description du monde et de son comportement aléatoire. L'incertitude épistémique est associée à un avis qu'un expert (ou quiconque d'autre) a sur la vérité. Cette incertitude est sujette à diminution en augmentant le nombre et la qualité des informations.

Exemple 1 : *La variabilité naturelle des sols empêche de connaître avec certitude la granulométrie d'un échantillon avant de l'avoir prélevé → incertitude stochastique.*

Exemple 2 : *L'expert pense que la lentille limoneuse s'étend sur 5.5 mètres → incertitude épistémique.*

## 2.4 Inconsistance

L'inconsistance apparaît suite à la présence d'informations provenant de plusieurs sources et entrant en contradiction. Le terme de conflit est également employé.

Exemple : *La méthode de tomographie de résistivité électrique indique la présence d'une cavité remplie d'eau alors que l'essai au pénétromètre indique la présence d'une cavité remplie d'air → inconsistance de l'information.*

## 3 Amélioration de la donnée en entrée

Une manière d'améliorer les résultats proposés par la fusion peut consister à affiner les données utilisées en entrée. Il peut être envisagé de lier les données mesurées à des modèles de prédiction définis par d'autres observations. Prenons l'exemple d'une profondeur de nappe estimée via un modèle de prédiction tenant compte d'un relevé pluviométrique et d'une hauteur d'eau connue de la rivière à proximité. Le relevé de

la profondeur de nappe, réalisé après l'estimation, viendra corriger cette valeur estimée et pourra proposer une amélioration du modèle de prédiction, de plus en plus fiable au fil des acquisitions. Cette étape d'amélioration de la donnée consiste donc à évaluer la donnée utilisée en entrée du processus de fusion, en utilisant des modèles de prédiction plus ou moins complexes. Les techniques à utiliser sont fonction de la qualité, de la précision et de la quantité de données obtenues par les sources. Ici, trois méthodes sont proposées et discutées : la méthode des **moindres carrés**, la méthode du **maximum a posteriori** et la méthode du **filtre de Kalman**.

### 3.1 Méthode des moindres carrés

L'ajustement par la méthode des moindres carrés est une méthode de régression très couramment utilisée, élaborée par Legendre et Gauss au début du XIX<sup>ème</sup> siècle. Il existe également d'autres méthodes de régression non nécessairement quadratiques. Cette méthode consiste à ajuster au mieux une série de données  $(x_i, y_i)_{i=1, \dots, n}$  par une fonction mathématique adéquate. Si la relation établie est affine, on parle alors de régression linéaire (Figure I.8). Il s'agit de trouver les paramètres  $\theta$  minimisant  $\Delta(\theta)$ , la somme des carrés des différences entre les valeurs de  $f(x_i; \theta)$  (prédictions) et de  $y_i$  (mesures) :

$$\Delta(\theta) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \theta))^2 \quad (I.1)$$

Avec  $\Delta(\theta)$  pouvant être assimilé à une distance entre le modèle proposé (hypothèse) et les données acquises expérimentalement.

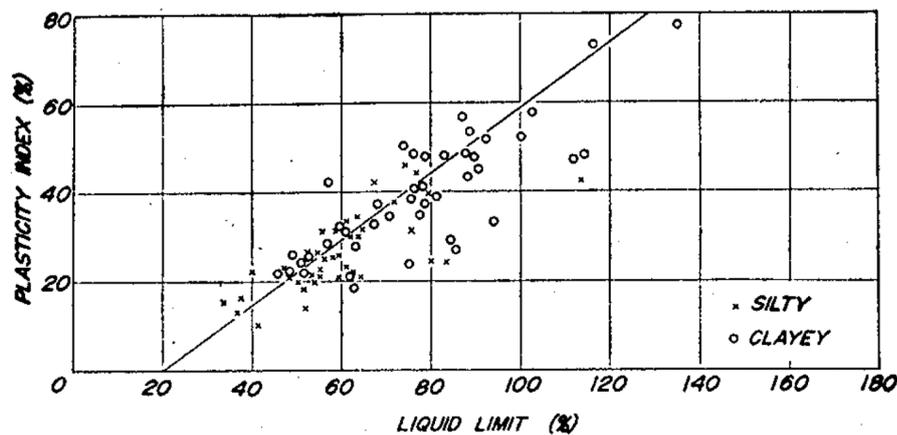


FIGURE I.8 – Indices de plasticité en fonction des limites de liquidité des alluvions. Illustration de l'utilisation de la méthode des moindres carrés avec droite de régression linéaire d'après Ohsaki (1962).

Afin d'utiliser de manière pertinente l'ajustement par la méthode des moindres carrés, il est donc nécessaire d'avoir un bon modèle décrivant au mieux les données, afin de minimiser les erreurs attachées aux valeurs expérimentales. La technique d'estimation des moindres carrés est applicable uniquement aux modèles de régression.

Une telle méthode de régression peut être envisagée dans une situation où le nombre de données est limité (campagne expérimentale) et les imperfections importantes.

### 3.2 Méthode du maximum de vraisemblance et du maximum a posteriori

Tous les modèles ne peuvent s'écrire comme une égalité entre la variable dépendante et une fonction de régression plus un terme d'erreur. Il est dans ce cas possible d'utiliser l'estimateur du maximum de vraisemblance qui est une méthode statistique pouvant être utilisée pour caractériser les paramètres d'une loi de probabilité d'un ensemble de données. Elle nécessite cependant certaines contraintes d'uniformité (Wasserman, 2013) pour être utilisée avec pertinence. Considérons  $X_{i=1,\dots,n}$  comme indépendantes et identiquement distribuées avec une densité de probabilité  $f(x; \theta)$  de paramètres  $\theta$ . La fonction de vraisemblance  $L_n(\theta)$  s'exprime (Wasserman, 2013) :

$$L_n(\theta) = \prod_{i=1}^n f(X_i, \theta) \quad (\text{I.2})$$

L'estimateur du maximum de vraisemblance  $\hat{\theta}_n$  correspond à la valeur de  $\theta$  maximisant  $L_n(\theta)$ . Une représentation de la fonction de vraisemblance est proposée Figure I.9.

La méthode du **maximum a posteriori** (MAP) est proche de l'estimateur du maximum de vraisemblance. Elle consiste pour sa part à déterminer  $\hat{\theta}_{MAP}$  maximisant  $L_n(\theta)p(\theta)$  où  $p(\theta)$  correspond à la distribution de probabilités a priori des paramètres  $\theta$ . L'estimateur MAP correspond donc à l'estimateur du maximum de vraisemblance avec une distribution fixée et non uniforme.

Pour l'utilisation de la méthode du **maximum a posteriori**, une première estimation des paramètres du sol (ex : analyses de laboratoire) est requise. Il est ensuite possible d'améliorer ces paramètres grâce à cet estimateur statistique. Cette méthode met à jour les valeurs de laboratoire : en minimisant la différence entre les mesures et prédictions et en minimisant la différence entre la valeur initiale et la valeur mise à jour des paramètres. Il est possible d'associer des poids à ces différences, permettant de juger de la qualité de l'observation.

Van Der Meij et al. (2012) suggèrent l'utilisation de cette méthode pour mettre à jour les données acquises dans des endroits où la quantité de données est faible. L'exemple suivant est pris : la performance d'une digue diminue avec le temps lorsque la hauteur de crête diminue. Des modèles mathématiques (entachés d'incertitudes) existent pour prédire les variations temporelles de hauteur de crête. Les données requises pour ces modèles sont des paramètres obtenus par l'expérience ou l'analyse de laboratoire. La méthode du **maximum a posteriori** permettrait de mettre à jour les valeurs des paramètres en minimisant les différences entre les mesures et les prédictions, mais également entre les valeurs initiales et les valeurs mises à jour. Des poids sont attachés à chaque différence, représentatifs de l'importance de ces

différences (un poids important étant représentatif d'une confiance plus importante attribuée à une mesure ou paramètre). Seules quelques mesures seraient suffisantes pour améliorer grandement la qualité de la prédiction.

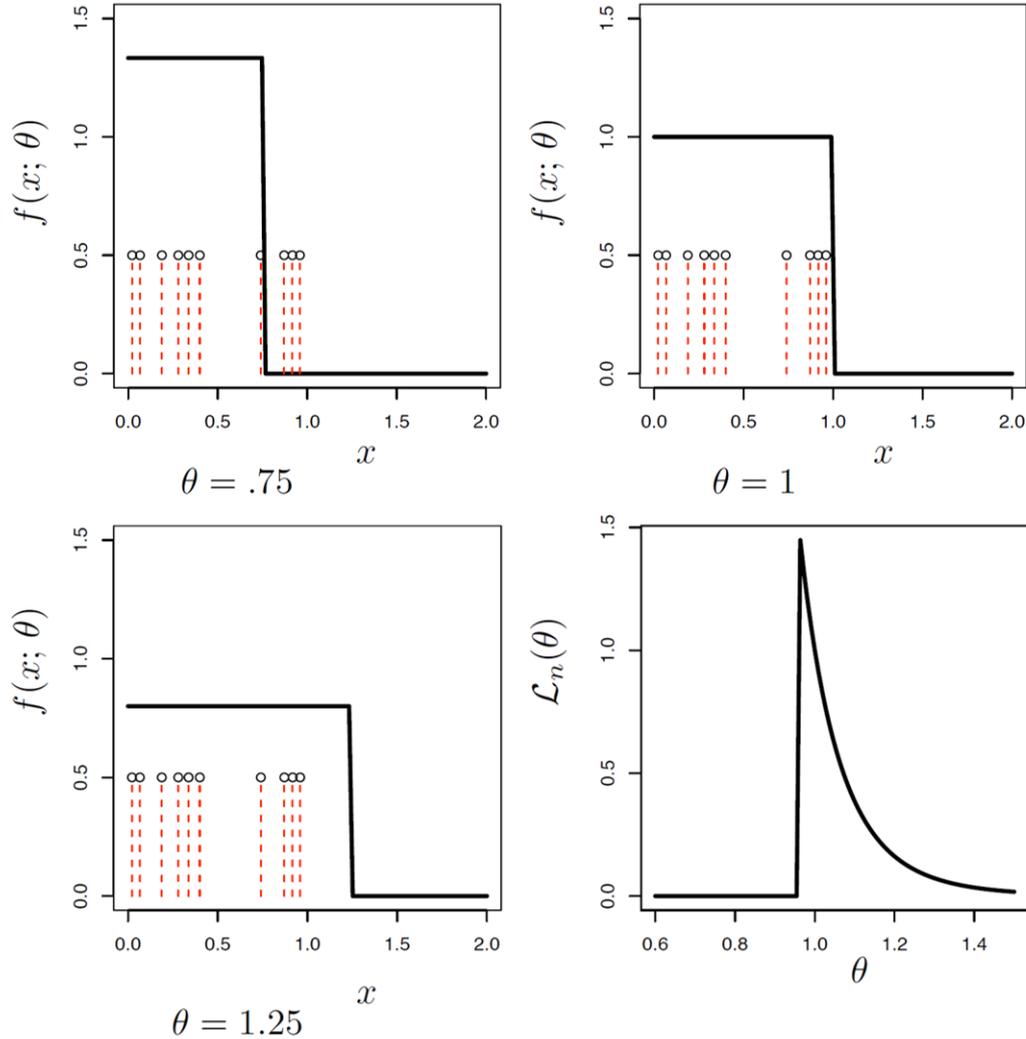


FIGURE I.9 – Représentation de la fonction de vraisemblance de distribution uniforme  $(0, \theta)$ . Les lignes verticales représentent les données observées. Les trois premiers graphiques montrent  $f(x; \theta)$  pour trois valeurs différentes de  $\theta$ . Quand  $\theta < X(n) = \max\{X_1, \dots, X_n\}$ , comme dans le premier graphique,  $f(X(n); \theta) = 0$  et ainsi  $L_n(\theta) = 0$ . Pour  $f(X_i; \theta) = 1/\theta$  pour chaque  $i$  et ainsi  $L_n(\theta) = (1/\theta)^n$ . Le dernier graphique présente la fonction de vraisemblance, d'après Wasserman (2013).

### 3.3 Méthode du filtre de Kalman

La méthode du filtre de Kalman (Kalman, 1960) permet l'estimation de l'état de paramètres évoluant dans le temps, à partir de données incomplètes ou imprécises. L'intérêt de la méthode réside dans sa capacité de prédiction des paramètres recherchés, ainsi que dans la rectification des erreurs associées aux sources et au

modèle mathématique. Le filtre de Kalman permet également de déterminer l'erreur moyenne de son estimation (matrice de covariance de l'erreur), qui tend à converger avec le temps. Cet estimateur a uniquement besoin de l'estimation  $\widehat{X}$  du paramètre au temps précédent  $k - 1$  et des mesures  $z$  à l'instant considéré  $k$ . L'historique des mesures et des estimations précédentes n'est pas nécessaire. L'utilisation de la formulation développée ci-dessous suppose que les bruits sont centrés, blancs, décorrélés entre eux et de l'état initial et de covariance connue (Durieu et al., 1996).

Le filtre de Kalman est un processus itératif dont l'état est représenté par deux variables notées  $\widehat{X}_{k|k}$  l'estimation de l'état à l'instant  $k$  et  $P_{k|k}$  sa matrice de covariance. L'utilisation du filtre peut se décomposer en deux phases : i) la phase de **prédiction** se basant sur l'état estimé au temps précédent pour prédire l'état présent et ii) la phase de **correction** qui utilise les mesures de l'instant  $k$  pour mettre à jour l'état prédit afin de contraindre l'estimation.

Lors de la phase de prédiction, l'état à l'instant  $k$ ,  $\widehat{X}_{k|k-1}$ , est prédit à partir de l'état estimé au temps  $k - 1$ ,  $\widehat{X}_{k-1|k-1}$  (I.3) et une estimation de la matrice de covariance est calculée  $P_{k|k-1}$  (I.4) :

$$\widehat{X}_{k|k-1} = F_k \widehat{X}_{k-1|k-1} + B_k U_k \quad (\text{I.3})$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (\text{I.4})$$

Avec  $F_k$  la matrice reliant l'état au temps  $k - 1$  à l'état au temps  $k$ ,  $B_k$  la matrice appliquée à l'entrée de commande  $U_k$ , et  $Q_k$  la matrice de covariance du bruit de l'état au temps  $k$ . La phase de correction s'ensuit alors et il est possible de prédire l'observation,  $H_k \widehat{X}_{k|k-1}$ , et sa précision associée  $S_k$  :

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (\text{I.5})$$

Avec  $H_k$  la matrice reliant l'état  $X_k$  à la mesure  $z_k$  et  $R_k$  la matrice du bruit d'observation. Il s'agit ensuite de calculer le gain de Kalman optimal à l'instant  $k$ ,  $K_k$ , qui attribue plus ou moins d'importance à l'imperfection associée à l'estimation de l'état, ou bien à celle associée à la mesure, en fonction de la plus petite des deux. Pour cela, il est nécessaire de connaître l'imperfection dans l'estimation et l'imperfection dans la donnée mesurée :

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (\text{I.6})$$

Lorsque le gain de Kalman tend vers 1, alors les mesures sont précises mais l'estimation est instable (incertitude importante). En revanche, quand le gain de Kalman tend vers 0, l'estimation est fiable face aux mesures. Le gain de Kalman converge nécessairement vers 0 avec le temps.

Le calcul de l'estimation de l'état mis à jour,  $\widehat{X}_{k|k}$ , peut alors s'opérer. Cette estimation est fonction du gain de Kalman,  $K_k$ , de l'estimation à l'itération précédente  $\widehat{X}_{k|k-1}$  ainsi que de la valeur mesurée  $z_k$ . Le gain de Kalman décide d'attacher plus ou moins d'importance à la valeur mesurée ou à l'estimation précédente :

$$\widehat{X}_{k|k} = \widehat{X}_{k|k-1} + K_k(z_k - H_k\widehat{X}_{k|k-1}) \quad (\text{I.7})$$

Il est également possible de calculer la matrice de covariance associée à l'estimation de l'état,  $P_{k|k}$ . Cette erreur est fonction du gain de Kalman et de l'erreur faite sur l'estimation à l'itération précédente :

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (\text{I.8})$$

Avec  $I$  la matrice identité.

Une des limites de cette méthode est qu'il faut un système modélisé assez précisément. Si l'imprécision associée à la modélisation est trop importante, l'erreur associée aux paramètres estimés ne convergera pas assez vite (Rhudy, 2015). Une autre limite est que le modèle de bruit considéré doit nécessairement être gaussien. En plus de cela, le système que l'on souhaite modélisé doit être linéaire. Un filtre de Kalman dit « étendu » existe pour des modélisations non linéaires mais la convergence de l'erreur n'est plus garantie et le temps de calcul est beaucoup plus important.

Van Der Meij et al. (2012) suggèrent l'utilisation d'un tel estimateur pour l'amélioration d'un modèle disposant de nombreuses données et d'un modèle déjà relativement fiable. L'utilisation d'un tel estimateur aurait sa place dans le cadre d'une étude réalisant plusieurs acquisitions au cours du temps (monitoring).

## 4 Modèles de combinaison

L'amélioration de données en entrée ne peut améliorer le résultat obtenu en sortie si le modèle de combinaison retenu n'est pas adapté. En fonction de la problématique, de la nature et de la quantité de données en entrée, il est donc primordial de choisir le modèle de combinaison le plus adapté. Dans le cadre de notre problématique, nous souhaitons combiner des informations imparfaites de natures différentes (différentes valeurs de paramètres physiques distincts, fonction de la méthode de reconnaissance) afin de renseigner sur la répartition des ensembles lithologiques selon des coupes verticales, au sein de l'ouvrage hydraulique, en attachant un indice de confiance aux résultats issus d'une telle fusion. La nature du résultat post-fusion souhaité correspond à un « type de matériau » alors que les données en entrée correspondent à des « valeurs numériques » issues des campagnes d'acquisition géophysiques et géotechniques. Des techniques avancées de combinaison sont donc nécessaires puisque nous travaillons avec différents types d'informations en entrée et en sortie. Bien que très nombreuses dans la littérature, six approches sont retenues et présentées rapidement

ici : les **réseaux de neurones artificiels**, la théorie des **probabilités**, la théorie des **probabilités subjectives**, la théorie des **sous-ensembles flous**, la théorie des **possibilités** et la théorie des **masses de croyance**.

#### 4.1 Réseaux de neurones artificiels

L'approche des réseaux de neurones artificiels, bien que conçue par McCulloch and Pitts (1943) et initiée par Rosenblatt (1958) avec son « perceptron » ; a été popularisée par Hopfield (1982) qui a proposé la structure de l'apprentissage que l'on connaît actuellement. Ce modèle de combinaison de l'information s'inspire du fonctionnement des neurones biologiques présents dans le cerveau, de par leur capacité à traiter un très grand nombre d'informations de natures différentes mais également de par leur faculté d'apprentissage. Dans le cadre de cette approche, les neurones artificiels sont interconnectés et reçoivent en entrée des informations (symbolisées par des flèches, Figure I.10) provenant de neurones amonts. La valeur de l'état du neurone est calculée à l'aide d'une fonction de transfert qui peut être de multiples formes. On associe un poids,  $w$ , au lien reliant deux neurones, qui est fonction de la force de la relation liant ces deux neurones. La valeur du poids peut être positive, on parle de **connexion excitatrice** entre deux neurones, ou négative, on parle alors de **connexion inhibitrice**.

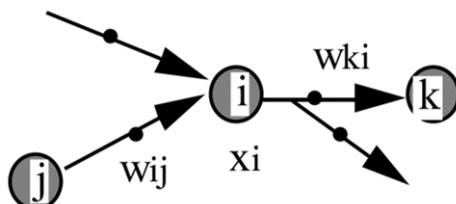


FIGURE I.10 – Exemple d'un réseau de trois neurones artificiels ( $j$ ,  $i$  et  $k$ ). Les entrées sur le neurone  $i$  sont de poids  $w_{ij}$  alors que les sorties en aval sont de poids  $w_{ki}$ , d'après Touzet (1992).

Il existe de nombreuses structures de réseaux de neurones, adaptées au problème posé. La structure la plus classique est le réseau multicouches (Figure I.11) où les neurones sont disposés sous forme de couches et où les connexions des neurones ne se font qu'avec les couches « avales ». L'information circule depuis la couche d'entrée jusqu'à la couche de sortie, visible en fin de calcul. Entre ces deux couches, un grand nombre de couches cachées peuvent être présentes, réalisant les opérations exigées par l'opérateur.

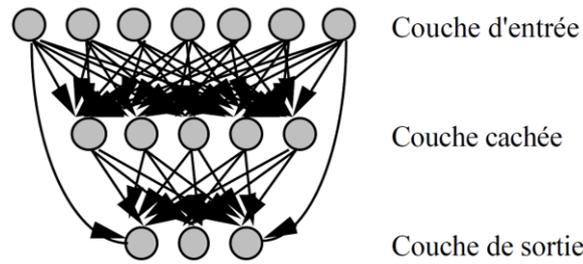


FIGURE I.11 – Exemple d'un réseau de neurones multicouches, d'après Touzet (1992).

Il existe également des réseaux de neurones à connexions locales où chaque neurone ne possède qu'un faible nombre de liens localisés avec les neurones de la couche « avale » (Figure I.12.a). Des réseaux à connexions récurrentes (Figure I.12.b) permettent de ramener l'information en amont, contrairement au sens de circulation établie dans un réseau de neurones multicouches classique. Enfin, il existe des réseaux de neurones à connexions complètes où chaque neurone est lié à tous les autres neurones du réseau (Figure I.12.c).

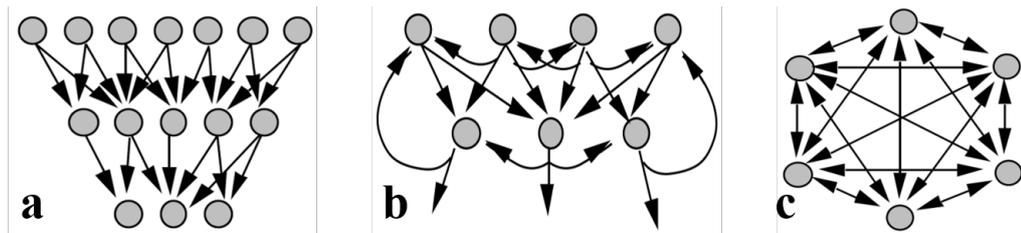


FIGURE I.12 – Réseau de neurones multicouches à connexions a) locales, b) récurrentes, c) complètes, d'après Touzet (1992).

L'intérêt des réseaux de neurones réside dans leur capacité d'apprentissage. En leur fournissant un très grand nombre d'informations fiables au niveau des couches d'entrée et de sortie, ces réseaux, à l'aide d'un algorithme d'apprentissage, modifient les poids des relations entre neurones afin d'accorder au mieux la réponse (en sortie) du réseau de neurones grâce aux exemples et expériences fournies par l'opérateur. La limite à cette méthode est que ces réseaux ont besoin d'un très grand nombre d'informations afin de réaliser leur apprentissage. En plus de cela, l'apprentissage est d'autant plus long que le problème à résoudre est complexe (cf deep learning, (LeCun et al., 2015)) et les réseaux n'autorisent pas l'extrapolation des résultats proposés.

Mata (2011) propose l'utilisation de réseaux de neurones artificiels afin d'estimer la réponse structurale d'un barrage en béton en fonction du niveau du réservoir ainsi que de la température extérieure. Pour ce faire, l'utilisation de données précises, acquises durant 25 ans, a été nécessaire. Cette approche est également utilisée en géophysique, notamment en sismique, pour interpréter les données (Peters et al., 2019; Waldeland et al., 2018; Zhao, 2018) ou pour réduire le niveau de bruit des

signaux (Zhu et al., 2018). Rymarczyk et al. (2018) utilisent également des réseaux de neurones artificiels pour convertir un signal électrique en pixels. En dehors de la géophysique, Sulewska (2017) présente plusieurs applications possibles pour une telle approche dans le cadre de problématiques d'ingénierie géotechnique. Enfin, Mola-Abasi et al. (2013) mettent en relation des paramètres physiques avec des propriétés géotechniques à partir de nombreux jeux de données.

#### 4.2 Théorie des probabilités « fréquentiste »

La théorie des probabilités est une théorie mathématique permettant de représenter des problèmes régis par le hasard et l'incertitude. Kolmogorov (1933) définit trois axiomes à la base de la théorie des probabilités. Il s'agit de considérer un univers  $\Omega$ , contenant tous les résultats possibles du problème posé, dans lequel sont inclus tous les sous-ensembles  $A$  de l'univers, associés à des mesures de probabilité  $P$ . L'espace  $(\Omega, A, P)$  respecte les trois axiomes de Kolmogorov suivants :

- La probabilité d'un événement est nécessairement comprise entre 0 et 1 :

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad (\text{I.9})$$

- La probabilité de l'univers  $\Omega$  est 1 :

$$P(\Omega) = 1 \quad (\text{I.10})$$

- Pour tout ensemble d'événements  $A_1, A_2, A_3, \dots$  deux à deux disjoints, on a :

$$P(\cup_{i \geq 1} A_i) = \sum_i^{+\infty} P(A_i) \quad (\text{I.11})$$

Un événement dont la réalisation est certaine aura une probabilité de 1 alors qu'un événement dont la réalisation est impossible aura une probabilité nulle. Une **variable aléatoire**  $X$  correspond à l'ensemble des issues possibles d'une expérience aléatoire ou incertaine. On peut lui associer une loi de probabilité (loi normale, exponentielle, uniforme...) qui se caractérise par i) une **fonction de répartition**  $F$  indiquant la probabilité que  $X$  soit inférieure ou égale à une valeur de  $x$  fixée ; et ii) une **densité de probabilité**  $f$ , tel que  $f$  est la dérivée de  $F$ .

Il est possible de déterminer la probabilité d'un événement de manière statistique (dite « **fréquentiste** » ou encore « **objective** »), en considérant qu'un événement se reproduit de la même manière lorsqu'on le répète un très grand nombre de fois. Il s'agit donc de réaliser des observations statistiques et cela suppose la détention d'un grand jeu de données afin d'avoir des probabilités reflétant la réalité. Cette théorie peut donc être employée à condition d'effectuer au préalable une analyse statistique pour déterminer une loi de probabilité.

Peyras et al. (2009) proposent, par exemple, l'utilisation d'une méthode probabiliste pour la modélisation de la cote de remplissage d'une retenue de barrage. Ce travail repose sur une technique de simulation de type Monte-Carlo générant aléatoirement des hydrogrammes de crue utilisés dans les modèles. Anbazhagan et al. (2009) utilisent une approche probabiliste à partir de données acquises par la méthode MASW et Lacasse and Nadim (2007) analysent des données géotechniques avec une telle approche.

La théorie des probabilités connaît cependant des limites concernant la représentation d'informations non reproductibles de manière identique, qui peuvent donc difficilement s'exprimer dans un cadre fréquentiste mais plutôt sous forme d'avis, de jugements ou d'expertises. Cette théorie présente également des limites pour la représentation d'informations incertaines et incomplètes lorsqu'elles impliquent une part d'ignorance. Dubois and Prade (2006) identifient deux travers de la théorie : a) impossibilité de faire la distinction entre une situation où l'information est incomplète et une situation régie par l'aléatoire et b) difficulté de représenter des probabilités pour des sources de natures différentes et aux référentiels distincts. En effet, pour a), lorsqu'un phénomène est mal compris, par manque de connaissance, une distribution uniforme est considérée sans être nécessairement la plus fidèle à la réalité. Pour b), nous pouvons illustrer cette limite par un exemple concret présenté ci-dessous.

Exemple : *On indique à deux individus non-initiés et non présents sur site, qu'une digue est sur le point de rompre. On leur demande d'estimer, sous forme de probabilités, quel mécanisme sera impliqué dans la rupture de l'ouvrage. On indique à l'individu n° 1 que l'ouvrage peut se rompre suite à un processus de surverse ou suite à un processus d'érosion interne (EI). Cet individu propose donc les valeurs suivantes :  $P_1(\text{surverse}) = 1/2$  et  $P_1(EI) = 1/2$ . De la même manière, mais en précisant les solutions possibles (référentiel), on indique à l'individu n° 2 que l'ouvrage peut se rompre suite à un processus de surverse, d'érosion de conduit (EConduit), d'érosion de contact (Econtact), d'érosion régressive (ER) ou de suffusion (Suff). Cet individu propose donc les valeurs équiprobables suivantes :  $P_2(\text{surverse}) = 1/5$ ,  $P_2(EConduit) = 1/5$ ,  $P_2(Econtact) = 1/5$ ,  $P_2(ER) = 1/5$  et  $P_2(Suff) = 1/5$ , d'où  $P_2(EI) = 4/5$ . Les probabilités  $P_1$  et  $P_2$  diffèrent de manière importante, par faute d'un référentiel commun, alors qu'elles sont supposées représenter une réalité commune.*

### 4.3 Théorie des probabilités subjectives

La théorie des probabilités subjectives fonctionne de manière similaire à la théorie des probabilités « fréquentiste » présentée auparavant. La différence réside dans le fait qu'il est possible de travailler avec cette approche en ayant peu de données à disposition, sans réaliser d'analyse statistique permettant de déterminer une loi de probabilité. En effet, certains événements sont si rares ou particuliers qu'on ne dispose pas suffisamment d'informations à leur sujet pour pouvoir établir de loi de probabilité. La théorie des probabilités subjectives a été introduite par De Finetti

(1937) et consiste à demander l'avis « d'experts » sur un sujet particulier (il s'agit d'un processus dit d'« **élicitation** »). Ils doivent alors formuler leurs avis sous forme de densité de probabilité afin qu'ils puissent être utilisés par la suite (Cooke, 1991). Les probabilités sont dites « subjectives » car elles sont représentatives d'un niveau de croyance d'un individu en fonction de la question posée.

Vuillet (2012) précise qu'il existe plusieurs biais à la théorie des probabilités subjectives, notamment des biais psychologiques influençant les experts au moment d'émettre leurs avis. Un manuel d'emploi des probabilités subjectives destiné aux experts afin de limiter ces biais psychologiques est également proposé, dans le cadre d'un modèle d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des digues fluviales (Vuillet, 2012). Stewart (2000) considère que l'approche des probabilités subjectives est dominante dans la littérature pour l'évaluation des digues et barrages et Morgan and Keith (1995) proposent une étude où des experts climatologues font leurs prédictions climatiques sous forme de distributions de probabilités subjectives (Figure I.13). Enfin, Silva et al. (2008) proposent d'utiliser les probabilités subjectives pour déterminer les probabilités de rupture d'ouvrages par instabilité de talus.

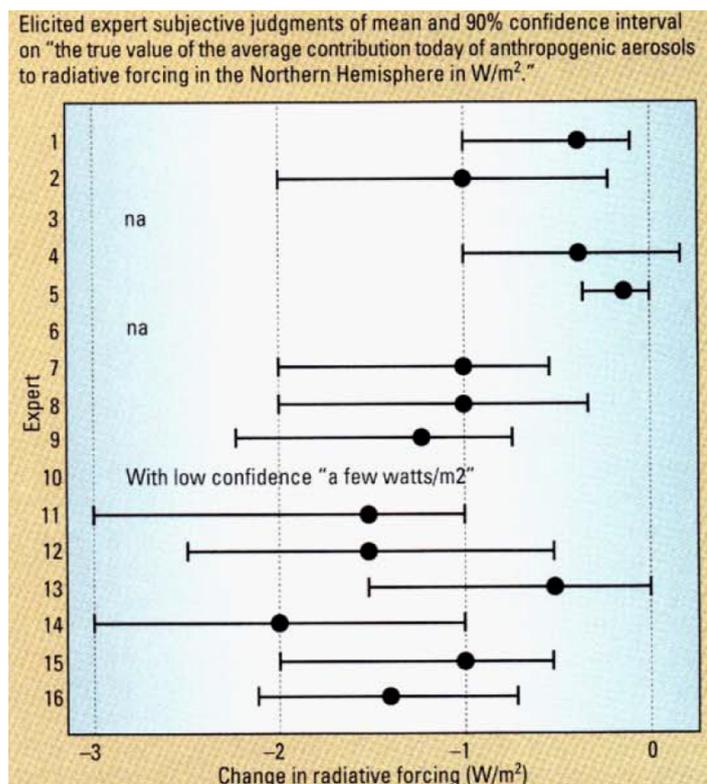


FIGURE I.13 – Exemple d'élicitations d'experts sur le forçage radiatif d'après Morgan and Keith (1995).

Un des résultats fondamentaux qui découlent de la théorie des probabilités est le **théorème de Bayes**. L'approche bayésienne intègre statistiques et avis subjek-

tifs, qui sont considérés comme de l'information a priori. Le théorème de Bayes permet d'ajuster les estimations d'une probabilité, à partir d'observations et de lois de probabilité associées à ces observations. Il consiste à introduire les probabilités conditionnelles qui permettent le calcul de la probabilité d'un événement  $A$ , sachant un événement  $B$ , notée  $P(A | B)$ . Le théorème de Bayes s'écrit alors :

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)} \quad (\text{I.12})$$

Puisque l'approche des probabilités subjectives ne repose pas sur des jeux de données véritablement acquis, s'il est décidé de travailler dans ce cadre, il s'agit de limiter les biais de représentativité qui peuvent être très importants.

#### 4.4 Théorie des sous-ensembles flous

La théorie des sous-ensembles flous a été proposée par Zadeh (1965). Elle est également présentée, reprise et détaillée dans Dubois and Prade (1980) et Zimmermann (1991). Cette théorie introduit le concept de fonction d'appartenance. Elle permet de caractériser l'appartenance d'un élément à un univers en lui associant un degré d'appartenance à un sous-ensemble dit « sous-ensemble flou ». Cette approche permet d'éviter une transition brutale au passage d'un ensemble à un autre, en définissant une appartenance graduelle à un sous-ensemble flou par une fonction d'appartenance non binaire. Ce cadre convient notamment aux problématiques pour lesquelles l'information s'exprime sous forme de langage imprécis qui peut se référer à une valeur ou note d'attribution.

Soit  $x$  les éléments de  $X$ . On définit un sous-ensemble flou  $A$  de  $X$  par une fonction d'appartenance notée  $\mu_A(x)$  (avec  $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ ). Cette fonction associe le degré  $\mu_A(x)$  à un élément  $x$  tel que  $x$  appartient au sous-ensemble  $A$ . Si la fonction d'appartenance ne prend que des valeurs égales à 0 ou 1, alors  $A$  est un sous-ensemble classique de  $X$  (fonction binaire). Une représentation d'un sous-ensemble flou est proposée Figure I.14. Ce schéma présente également les trois principaux éléments qui permettent de caractériser un sous-ensemble flou (Bouchon-Meunier and Marsala, 2003; Dubois and Prade, 2000).

En premier lieu, le « **noyau** », noté  $Noy(A)$ , qui correspond à la totalité des éléments  $x$  pour lesquels la fonction d'appartenance au sous-ensemble  $A$ ,  $\mu_A(x)$ , est égale à 1 :

$$Noy(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{I.13})$$

Puis le « **support** », noté  $Supp(A)$ , correspondant aux éléments pour lesquels la fonction d'appartenance associée est non-nulle :

$$Supp(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) \neq 0\} \quad (\text{I.14})$$

Et enfin la « **hauteur** », notée  $h(A)$ , qui correspond à la valeur maximale qu'atteint la fonction d'appartenance :

$$h(A) = \sup_{x \in X} (\mu_A(x)) \quad (\text{I.15})$$

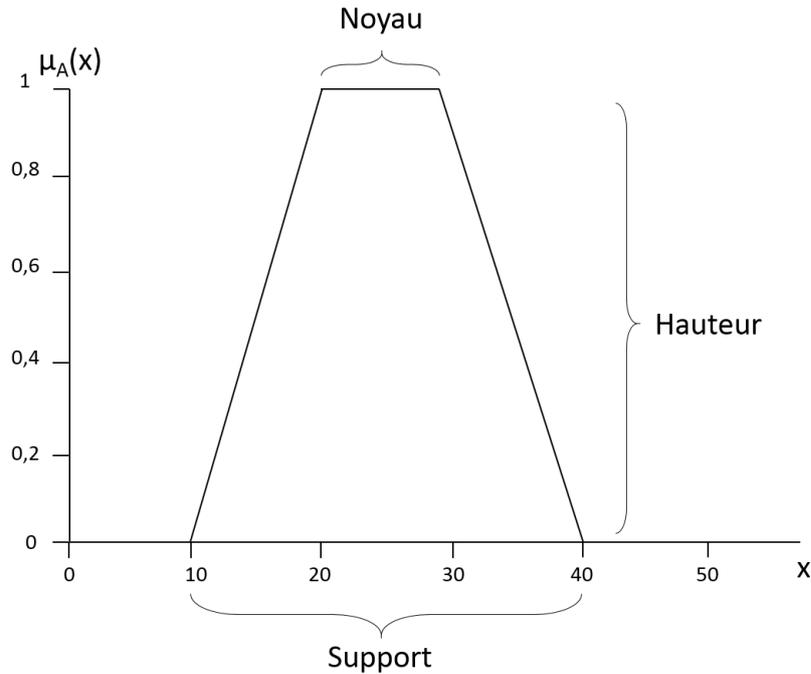


FIGURE I.14 – Représentation de la fonction d'appartenance trapézoïdale d'un sous-ensemble flou avec les trois principaux éléments le caractérisant.

Il existe également un outil dénommé «  **$\alpha$ -coupe** » permettant d'établir une limite inférieure en matière de degré d'appartenance et de ne garder que les valeurs supérieures. L' $\alpha$ -coupe de l'ensemble  $B_\alpha$ , s'écrit :

$$B_\alpha = \{x \in X \mid \mu_B(x) \geq \alpha\} \quad (\text{I.16})$$

Avec  $\alpha$  compris entre 0 et 1.

Il est possible de prendre en compte les conflits éventuels existant entre les différentes sources d'informations avec divers opérateurs. Ces opérateurs (ainsi que d'autres plus classiques) sont présentés et détaillés dans Bloch (2005) et dans Dubois and Prade (2000). De nombreux travaux reposent sur une approche de logique floue, parfois associée à des algorithmes de partitionnement (clustering), afin de classer les informations en leur associant des degrés d'appartenance (Bárdossy and Samaniego, 2002; Gong et al., 2014; Paasche and Tronicke, 2007).

Il apparaît que la théorie des sous-ensembles flous est extrêmement pertinente pour la représentation d'informations imprécises grâce à l'utilisation de fonctions d'appartenance. Elle s'avère en particulier précieuse pour considérer des avis d'experts. En revanche, la représentation des incertitudes n'est pas envisageable à l'aide de sous-ensembles flous (Martin, 2005). Ce manque sera plus tard comblé par la théorie des possibilités (Zadeh, 1978) en conservant le cadre de la logique floue.

#### 4.5 Théorie des possibilités

Cette théorie repose aussi sur une logique d'appartenance à des sous-ensembles flous mais en tenant compte cette fois des incertitudes associées aux données. Elle a été proposée par Zadeh (1978). La fonction d'appartenance à un ensemble flou est considérée comme une distribution de possibilités (Dubois and Prade, 1985) et vaut nécessairement 1 pour au moins une valeur de  $x$  (hypothèse d'un monde fermé dans lequel au moins un événement est complètement possible). Contrairement à la théorie probabiliste, l'incertitude d'un événement est caractérisée par deux valeurs : sa valeur de **possibilité** et sa valeur de **nécessité**.

En reprenant les notations utilisées par Tacnet (2009) et Masson (2005), considérons l'ensemble  $P(X)$  des sous-ensembles de  $X$ . La mesure de possibilité, notée  $\Pi$ , est une fonction définie dans  $[0, 1]$  telle que pour tout  $(A, B) \in P(X)^2$  :

$$\Pi(A) = 0 \Leftrightarrow A \text{ est impossible} \quad (\text{I.17})$$

$$\Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B)) \quad (\text{I.18})$$

Et la mesure de nécessité, notée  $N$ , est également définie dans  $[0, 1]$  telle que :

$$N(A) = 1 \Leftrightarrow A \text{ est certain} \quad (\text{I.19})$$

$$N(A \cap B) = \min(N(A), N(B)) \quad (\text{I.20})$$

La possibilité  $\Pi$  est très différente d'une probabilité, elle renseigne un degré pour lequel l'événement est susceptible de se réaliser (Bouchon-Meunier, 1995) alors que la nécessité  $N$  fournit un degré qui renseigne sur la certitude de la réalisation d'un événement, pouvant être assimilé à un niveau de confiance. Une valeur de nécessité nulle est équivalente à une ignorance complète.

Les mesures de possibilité et de nécessité sont caractérisées par une distribution de possibilité,  $\pi : X \rightarrow [0, 1]$ , tel que pour tout  $A \in X$  :

$$\Pi(A) = \sup_{w \in A} (\pi(w)) \quad (\text{I.21})$$

$$N(A) = \inf_{w \notin A} (1 - \pi(w)) = 1 - \pi(\bar{A}) \quad (\text{I.22})$$

En considérant  $\bar{A}$  comme l'événement contraire de  $A$ . Cette dernière relation signifie qu'un événement est considéré comme certain si son contraire est considéré impossible.

Dans le cadre de cette approche, il s'agit donc de construire une distribution de possibilités (comme on le ferait pour une distribution de probabilités) en lui associant des valeurs de « nécessité » qui caractérisent le niveau de certitude que l'on a sur l'information fournie. Tout comme pour la théorie des sous-ensembles flous, la théorie des possibilités propose des distributions s'apparentant à la Figure I.14 avec la présence d'un noyau et d'un support selon les mêmes définitions que celles présentées plus haut. Le noyau correspond donc à un intervalle précis mais incertain et le support correspond à un intervalle imprécis mais certain. Les opérateurs pour la combinaison d'informations sous les mêmes que pour la théorie des sous-ensembles flous, détaillés dans Bloch (2005).

Curt et al. (2008) et Talon et al. (2012) utilisent la théorie des possibilités en évaluant des indicateurs de performance, dans le cadre de l'évaluation des risques de rupture de barrages à l'aide d'évaluations d'experts. Cette approche est également utilisée par Grandjean et al. (2007) pour la fusion de données géophysiques.

La théorie des possibilités est donc une alternative à la théorie des probabilités, permettant de gérer l'imprécis et l'incertain. Elle est une généralisation de la théorie probabiliste, en effet la **possibilité** d'un événement correspond à la probabilité supérieure et la **nécessité** à la probabilité inférieure de cet événement. Les possibilités ne permettent cependant pas de représenter la fiabilité des sources d'information (Tacnet, 2009).

#### 4.6 Théorie des masses de croyance

La théorie des **masses de croyance**, ou **théorie de l'évidence**, ou encore **théorie de Dempster-Shafer**, est une théorie qui a été proposée par Shafer (1976) à partir de travaux de Dempster (1967). Il est possible de l'assimiler, dans une certaine mesure, à une généralisation de la théorie des probabilités et des possibilités (Bouchon-Meunier, 1995). Cette théorie consiste à modéliser la croyance en une hypothèse à partir de la fusion de fonctions de **masses de croyances** représentant au mieux les connaissances disponibles. La théorie est clairement exposée et détaillée dans Martin (2005).

Il s'agit d'abord de considérer un cadre de discernement (Frame of Discernment), noté  $\Theta$ , comme étant un ensemble fini regroupant les  $n$  solutions (hypothèses) possibles (sous forme de classes ou d'ensembles) du problème considéré, ces hypothèses étant exhaustives et exclusives :

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} \tag{I.23}$$

L'ensemble, habituellement noté  $2^\Theta$ , regroupe les sous-ensembles de  $\Theta$  et les sous-ensembles issus de leurs unions (disjonctions). Il est appelé **powerset de  $\Theta$**  et comprend également l'ensemble vide  $\emptyset$  représentatif du **conflit** entre les sources d'information :

$$2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2, \theta_3, \theta_1 \cup \theta_3, \theta_2 \cup \theta_3, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3, \theta_n, \dots, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \dots \cup \theta_n\} \quad (\text{I.24})$$

La fonction masse de croyance  $m(\cdot)$ , représentative d'une connaissance imparfaite, est définie, pour une source d'information  $S_j$ , telle que :

$$\left\{ \begin{array}{l} m(\cdot) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1] \\ m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \in 2^\Theta} m_j(A) = 1 \end{array} \right. \quad (\text{I.25})$$

Tous les éléments de l'ensemble  $A$  de  $\Theta$ , tel que  $m(A) > 0$ , sont appelés des éléments focaux de  $A$ . Plus  $m(A)$  tend vers 1 et plus la confiance en  $A$  est importante. La grande différence avec la théorie probabiliste réside dans le fait que  $A$  peut ici représenter l'union de deux ensembles de  $\Theta$ . Il est donc possible de modéliser l'incertitude et le manque de connaissances. Si elle n'est définie que sur des singletons (aucune masse n'est attribuée à l'union d'hypothèses), la fonction masse de croyance s'apparente à une distribution de probabilités.

Shafer (1976) définit les fonctions de crédibilité (belief)  $Bel(A) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  et de plausibilité  $Pl(A) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ , telles que, pour tout  $A \in 2^\Theta$  :

$$Bel(A) = \sum_{\substack{B \subseteq A \\ B \in 2^\Theta}} m(B) \quad (\text{I.26})$$

$$Pl(A) = \sum_{\substack{A \cap B \neq \emptyset \\ B \in 2^\Theta}} m(B) \quad (\text{I.27})$$

La crédibilité est représentative de la masse de croyance fournie par une source d'information, soutenant  $A$ , alors que la plausibilité est représentative de la masse de l'ensemble des informations, issues d'une source, qui ne contredisent pas  $A$ . Une relation liant ces deux fonctions existe :

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (\text{I.28})$$

L'intervalle  $[Bel(A), Pl(A)]$  correspond à l'incertitude associée à l'élément focal  $A$ . Les fonctions de crédibilité et de plausibilité sont interprétées comme étant les limites basses et hautes de la distribution de probabilité de  $A$ , tel que  $Bel(A) \leq P(A) \leq Pl(A)$ .

Dans le cadre de la théorie des masses de croyance, il est possible de faire l'hypothèse de Dempster-Shafer d'un « **monde fermé** », c'est-à-dire que toutes les solutions au problème fixé se trouvent dans  $\Theta$  :

$$m(\emptyset) = 0 \quad (\text{I.29})$$

Il est également possible de faire l'hypothèse d'un « **monde ouvert** » (Smets, 1990) en considérant qu'une solution en-dehors du cadre de discernement est envisageable :

$$m(\emptyset) > 0 \quad (\text{I.30})$$

La combinaison des informations peut être faite en utilisant différentes règles de combinaison (détails au Chapitre II, Partie A.). L'hypothèse d'un monde fermé de Dempster-Shafer induit une normalisation des masses de croyance associées aux différentes hypothèses par la masse de croyance obtenue sur le conflit ( $\emptyset$ ), tandis que l'hypothèse d'un monde ouvert permet d'être renseigné sur le niveau d'ignorance.

Cette approche a été utilisée dans le domaine des géosciences pour considérer la fusion de plusieurs types de données afin de proposer une représentation des résultats sous forme de carte, pouvant être implémentée dans des systèmes d'informations géographiques (Malpica et al., 2007; Moon, 1990; Tangestani, 2009; Tangestani and Moore, 2002).

L'intérêt de cette approche réside dans la combinaison d'informations issues de différentes sources, en tenant compte des imprécisions et incertitudes variables, ainsi que dans sa capacité à évaluer le degré de conflit existant entre les différentes sources d'information. Elle permet également la prise en compte de l'ignorance. Vuillet (2012) souligne le fait que la théorie des masses de croyance permet de fusionner des intervalles disjoints (non emboîtés), contrairement à la théorie des possibilités de Zadeh. En revanche, une des difficultés de cette approche concerne l'estimation des masses de croyance de chacune des sources d'information (Martin, 2005).

## 5 Ajustement du résultat en sortie

Il est possible d'ajuster la qualité des résultats autrement que par l'amélioration de la donnée d'entrée ou par l'amélioration du modèle de combinaison retenu. En effet, les résultats peuvent être directement ajustés sur la base d'informations qui n'avaient pas été prises en compte, délibérément ou non, lors du processus de fusion.

Dans le cadre d'une campagne de reconnaissance sur ouvrage hydraulique en terre, des données non-issues de méthodes d'investigation géophysiques ou géotechniques pourraient être prises en compte. Elles sont souvent nombreuses et peuvent se révéler riches en informations. Ainsi, connaître la position d'un terrier de blaireau, d'une ancienne zone de brèche ou d'une ancienne souche d'arbre permettrait d'avoir un regard critique sur les résultats issus de la fusion et d'améliorer leur lecture. Ces informations peuvent provenir d'inspections visuelles ou de formulaires contenant

des données historiques sur l'ouvrage. Il n'y a pas de méthodes spécifiques pour l'ajustement des résultats en sortie, elles sont fonction du contexte et de la problématique fixée.

Si les résultats issus de la fusion ne permettent pas de se prononcer sur la présence d'un matériau géologique plutôt qu'un autre, la prise en compte d'informations supplémentaires en sortie pourrait autoriser l'opérateur à réaliser une distinction et améliorer la prise de décision. Van Der Meij et al. (2012) prennent pour exemple la courbe de fragilité qui présente les performances d'un remblai en informant sur le risque de rupture en fonction du niveau d'eau. Au fil de l'acquisition supplémentaire de données, le modèle de la courbe de fragilité pourrait être modifié et mis à jour.

## 6 Conclusion

A l'issue de la présentation des méthodes d'amélioration de la donnée en entrée, d'adaptation du modèle de combinaison et d'ajustement des résultats en sortie, il s'agit de retenir une méthode spécifique pouvant s'implémenter dans une méthodologie de combinaison d'informations issues de sources géotechniques et géophysiques pour la caractérisation de digues de protection fluviales. Cette méthodologie devra permettre de tenir compte des quatre sources d'imperfection détaillées plus haut (imprécision, incertitude, incomplétude et inconsistance). L'objectif de la méthodologie de fusion à développer est de combiner les informations de façon à proposer une représentation 2D de l'ouvrage, sous forme de répartition des matériaux géologiques avec caractérisation des interfaces. Dans les résultats, il serait souhaitable que la présence éventuelle d'éléments anomaliques puisse être mis en évidence. Il serait également précieux de pouvoir déterminer un indice de confiance associé aux résultats proposés afin d'aider à la prise de décision.

Les méthodes d'amélioration de la donnée en entrée (moindres carrés, maximum a posteriori, maximum de vraisemblance, filtre de Kalman) ne semblent pas répondre à nos exigences. En effet, nous ne souhaitons pas utiliser de modèles de prédiction de l'information car les paramètres physiques quantifiés par les différentes méthodes géophysiques et géotechniques employées sur OHT sont susceptibles d'être propres à chaque méthode d'investigation. Malheureusement, les relations liant un paramètre à un autre ne sont pas nécessairement assez fortes pour pouvoir déterminer un modèle de prédiction, l'imperfection d'une telle relation pourrait être potentiellement plus importante que l'imperfection sur la mesure. Un aspect intéressant de l'amélioration de la donnée en entrée concerne l'amélioration de la donnée dans le temps. Lors d'un suivi d'ouvrage (ex : monitoring à l'aide de dispositif d'électrodes ou dispositif de fibre optique) l'utilisation du filtre de Kalman pourrait s'avérer pertinente afin d'améliorer le modèle de prédiction au fil des acquisitions. La caractérisation de l'évolution temporelle des OHT ne rentre cependant pas dans notre problématique et ne sera pas développée dans ce travail de thèse.

Dans la méthodologie que nous proposons de développer, nous suggérons **l'utilisation de la donnée en entrée telle qu'elle est fournie par le géophysicien**

et le géotechnicien lors de campagnes classiques effectuées, avec ses imperfections associées, qui seront alors prises en considération lors du processus de fusion. Parmi les différentes approches de combinaison présentées, il s'agit de retenir la plus adaptée à notre problématique :

- Les **réseaux de neurones artificiels** semblent difficiles à mettre en œuvre puisqu'il faudrait avoir à notre disposition de nombreux cas fiables d'OHT correctement modélisés permettant l'apprentissage de tels réseaux ainsi que de nombreux jeux de données brutes, correctement associées à la caractérisation d'OHT, pour les faire fonctionner. Ne disposant pas de telles informations, nous écartons cette approche d'apprentissage.

- Les **probabilités fréquentistes** nécessitent également d'importants jeux de données afin de réaliser des analyses statistiques sur lesquelles elles reposent. De plus, cette approche ne permet pas de représenter les informations incomplètes contenant une part d'ignorance puisque la distinction ne peut être faite entre le concept d'ignorance et le concept d'aléa. Enfin, les probabilités ne sont pas adaptées à la combinaison de données issues de sources de natures différentes tel que c'est le cas ici.

- Les **probabilités subjectives** présentent de nombreux biais de représentativité qu'il est nécessaire de limiter au maximum. Cette approche ne semble pas être la plus adaptée car nous souhaitons proposer une méthodologie pouvant être employée en utilisant de multiples jeux de données de natures différentes sans avoir à passer par un processus d'élicitation d'expert à chaque acquisition.

- L'approche des **sous-ensembles flous** permet une excellente représentation des imprécisions mais pas des incertitudes. Cette théorie fait correspondre des informations floues (telles que des informations formulées par le langage) avec des valeurs chiffrées.

- La théorie des **possibilités** prend en compte les notions d'imprécision et d'incertitude mais ne considère cependant pas les fiabilités relatives des sources d'information et ne peut réaliser de fusion d'intervalles de valeurs disjoints.

- La théorie des **masses de croyance** est une généralisation de la théorie des possibilités et des probabilités. Elle semble la plus adaptée à notre problématique puisqu'elle permet de prendre en considération les quatre formes d'imperfection dont nous souhaitons tenir compte (imprécision, incertitude, incomplétude, inconsistance entre les sources) sans avoir à disposer d'une quantité importante de données.

L'ajustement des résultats en sortie de fusion est une action à considérer afin d'améliorer le regard porté sur les résultats proposés et de permettre de prendre une décision avec un plus grand nombre d'éléments extérieurs en support (données his-

toriques, inspection visuelle. . . ). Cette étape ne serait en revanche pas implémentée dans la méthodologie développée mais à considérer lors d'éventuels post-traitements des résultats.

Dans le chapitre suivant, nous reviendrons en détail sur la théorie des masses de croyance, en précisant plusieurs règles de combinaison existantes accompagnées d'exemples illustratifs. Nous détaillerons ensuite la méthodologie de combinaison mise en place dans le cadre de ces travaux de thèse, en accord avec l'approche de fusion retenue et avec un modèle synthétique à l'appui.

---

## Chapitre II

### Méthodologie de fusion d'informations géophysiques et géotechniques développée dans le cadre de la théorie des masses de croyance

---

Ce deuxième chapitre de thèse détaille, au sein de la **Partie A**, la théorie des masses de croyance, retenue au précédent chapitre comme approche de fusion de l'information. Les trois règles de combinaison présentées et illustrées dans cette partie sont ensuite mises en place dans la méthodologie de fusion développée, dédiée à la combinaison d'informations issues de sources d'information géophysiques et géotechniques. Cette méthodologie, qui est le coeur de ce travail de thèse, est détaillée point par point dans la **Partie B** de ce chapitre. Nous y développons la construction des masses de croyance pour chacune des sources d'information, leur représentation dans un espace 2D de sous-sol ainsi que leur combinaison et la présentation des résultats. Des travaux reprenant des résultats issus de cette méthodologie avec des exemples numériques, ont été présentés dans le cadre du colloque national GEOFCAN 2018 (Dezert et al., 2018b) et des colloques internationaux Belief 2018 (Dezert et al., 2018a) et Near Surface Geoscience 2018 (Dezert et al., 2018c).

---

# Chapitre 2

---

<b>A</b>	<b>Théorie des masses de croyance</b> . . . . .	77
1	Introduction . . . . .	77
2	Représentation de l'information . . . . .	77
2.1	Cas particuliers de fonctions de masse de croyance . . . . .	77
2.2	Représentation de l'information : différence avec le cadre probabiliste . . . . .	78
3	Règles de combinaison . . . . .	79
3.1	Hypothèse d'un monde fermé : règle de Dempster-Shafer . . . . .	79
3.2	Hypothèse d'un monde ouvert de Smets . . . . .	80
3.3	Règle de PCR6, Proportional Conflict Redistribution rule no 6 . . . . .	81
4	Exemple illustratif de l'application des règles de combinaison . . . . .	82
5	Mise en difficulté de la règle de combinaison de Dempster-Shafer . . . . .	84
6	Utilisation dans le domaine des géosciences . . . . .	85
6.1	Risques de glissements de terrain . . . . .	85
6.2	Potentiel et qualité des eaux souterraines . . . . .	86
7	Conclusion . . . . .	87
<b>B</b>	<b>Méthodologie de fusion développée</b> . . . . .	89
1	Introduction . . . . .	89
2	Modèle considéré et cadre de discernement . . . . .	90
3	Construction de masses de croyance à partir de données géophysiques . . . . .	91
3.1	Construction d'un modèle géoélectrique et simulation d'acquisitions . . . . .	92
3.2	Reconstruction de la subsection de résistivités vraies . . . . .	93
3.3	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	96
3.4	Attribution des masses de croyance . . . . .	97
3.5	Section issue de la construction de masses de croyance géophysiques . . . . .	100
4	Construction de masses de croyance à partir de données géotechniques . . . . .	101
4.1	Caractérisation du cadre de discernement . . . . .	101
4.2	Simulation d'acquisition . . . . .	102
4.3	Attribution de masses de croyance dans les points de sondage et extension de l'information . . . . .	103
4.4	Combinaison d'information entre deux sondages . . . . .	105
4.5	Section issue de la construction de masses de croyance géotechniques . . . . .	107
5	Dimensionnement du maillage commun avant la fusion . . . . .	108
6	Fusion des informations géophysiques et géotechniques . . . . .	108
6.1	Règle de Smets . . . . .	108
6.2	Règle de Dempster-Shafer . . . . .	109

---

	6.3	Règle de PCR6 . . . . .	110
7		Conclusion . . . . .	111

---

# Partie A

## Théorie des masses de croyance

### 1 Introduction

Suite aux présentations des méthodes de combinaison de l'information au chapitre précédent, nous avons donc choisi de retenir la théorie des **masses de croyance** pour le développement de notre méthodologie de fusion d'informations issues de sources géophysiques et géotechniques.

La théorie des masses de croyance a été introduite par Shafer (1976) à partir des travaux antérieurs de Dempster (1967) traitant des bornes inférieures et supérieures des distributions de probabilités. Cette théorie est donc parfois appelée théorie de Dempster-Shafer, ou encore théorie de l'évidence (*evidence* étant un terme anglais faisant référence au mot *preuve*). L'intérêt des fonctions de masse de croyance réside dans leur capacité à modéliser les informations incertaines. Leur utilité a été démontrée plus tard par Smets (1990, 1997b) avec son Transferable Belief Model (TBM) qui propose une interprétation en dehors du cadre probabiliste et qui insiste sur la différenciation des étapes de « Représentation de l'information issue de la fusion » et de « Décision » à proprement parler.

Dans cette partie, nous considérons que le lecteur a pour acquis les éléments présentés Chapitre I, Partie B.4.6. Nous présentons ici certains cas particuliers de fonctions de croyance afin d'illustrer la partie précédente et de l'approfondir. Trois règles de combinaison, dans le cadre de la théorie des masses de croyance, ont été retenues et sont présentées dans cette partie, illustrées par des exemples concrets permettant de pointer leurs intérêts et limites. Nous proposons enfin deux travaux scientifiques se plaçant dans le cadre de la théorie des masses de croyance pour des problématiques de géosciences.

### 2 Représentation de l'information

#### 2.1 Cas particuliers de fonctions de masse de croyance

Bien que les bases de la théorie des masses de croyance aient été présentées Chapitre I, Partie B.4.6., attardons-nous ici à certains cas particuliers de fonctions de masses de croyance, permettant de mieux percevoir le cadre de réflexion de cette théorie. Considérons un cadre de discernement  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$  comme un ensemble fini contenant  $n$  éléments et l'ensemble  $2^\Theta$ , appelé le powerset de  $\Theta$ , regroupant tous les sous-ensembles de  $\Theta$ , les sous-ensembles issus de leurs unions et l'ensemble vide  $\emptyset$  représentatif du conflit entre les sources d'information.

Sachant que pour  $X \in 2^\Theta$ , il est considéré que :

- $m(X)$  représente le degré de **croissance** attribué à la proposition  $X$ ,
- $m(\Theta)$  représente le degré d'**ignorance**,
- $m(\emptyset)$  représente le niveau de **conflit** entre les sources (égal à 0 dans le cadre de l'hypothèse d'un **monde fermé** et strictement positif dans l'hypothèse d'un **monde ouvert**).

Nous pouvons décrire les cas particuliers suivants :

- Une proposition est considérée comme **certaine** si sa masse de croyance associée est égale à 1, de même, une masse de croyance est dite **catégorique** si un seul élément des propositions de  $2^\Theta$  est un élément focal, c'est à dire s'il existe un et un seul  $X \in 2^\Theta$  tel que  $m(X) = 1$ .

- Lorsque l'unique élément focal est  $\Theta$  ( $m(\Theta) = 1$ ), alors la masse de croyance est dite **vide**. C'est une fonction de masse catégorique sur  $\Theta$ . L'ignorance est alors **totale**.

- Inversement, lorsque la proposition  $\Theta$  n'est pas un élément focal ( $m(\Theta) = 0$ ), la masse de croyance est dite **dogmatique**.

- Une masse de croyance est dite **normale** si l'hypothèse d'un monde fermé est respectée, sinon elle est dite **sous-normale**.

- Lorsque le conflit est total, ( $m(\emptyset) = 1$ ), la masse de croyance est dite **contra-dictoire** ou encore **conflictuelle**.

- Lorsque les éléments focaux sont uniquement des singletons, la masse de croyance peut être assimilée à une distribution de probabilités, elle est dite **Bayésienne**.

## 2.2 Représentation de l'information : différence avec le cadre probabiliste

Le cadre de la théorie des fonctions de masses de croyance permet la modélisation d'informations incertaines contrairement au cadre probabiliste souvent considéré. Prenons l'exemple suivant afin de différencier les deux approches et percevoir la force du cadre de réflexion de la théorie des masses de croyance.

Supposons qu'un homme promène un animal insolite en laisse, dont personne ne connaît la nature exacte. Le problème consiste à modéliser la connaissance concernant l'espèce de l'animal, d'après le témoignage d'un passant l'ayant croisé, parmi trois espèces possibles tel que  $\Theta = \{Belette, Ours, Tortue\}$ . Le passant fait office de source d'information dans cet exemple.

Sans information spécifique sur la nature de l'espèce tenue en laisse, l'ignorance est totale et donc  $m(\Theta) = 1$ . Dans un cadre probabiliste, une distribution uniforme équiprobable sur les trois hypothèses aurait été considérée, telle que  $P(B) = P(O) = P(T) = 1/3$ . Contrairement à une fonction de probabilité, une fonction de masse de croyance n'est pas additive, signifiant que la masse sur l'union d'hypothèses n'est pas égale à la somme des masses de singletons la composant (Klir and Wierman, 2013). C'est cette propriété qui permet de modéliser l'incertitude.

Le témoin à disposition indique que l'animal croisé est un mammifère. Malheureusement, comme il faisait nuit lors de la rencontre, cette information n'est fiable qu'à 60%. Une modélisation de l'information sous forme probabiliste proposerait  $P(B) + P(O) = 0.6$  avec  $P(B) = 0.3$  et  $P(O) = 0.3$  en considérant les hypothèses comme équiprobables, et  $P(T) = 1 - 0.6 = 0.4$ . La modélisation sous forme de masses de croyance indiquerait en revanche  $m(B \cup O) = 0.6$  et  $m(\Theta) = 0.4$ , avec  $\cup$  l'union mathématique correspondant au "OU" logique. Aucune masse n'est ici allouée à l'hypothèse « Tortue » ( $m(T) = 0$ ) car celle-ci n'est jamais évoquée par le témoin. Les fonctions de masses de croyance ont l'avantage de ne pas introduire d'information a priori par rapport aux fonctions de probabilités.

Une fois que l'information imparfaite issue d'une source est modélisée, il s'agit de recueillir des informations supplémentaires issues d'autres sources. L'objectif étant de pouvoir les fusionner à l'aide des règles de combinaison présentées ci-après, afin de proposer la meilleure représentation possible des solutions au problème posé.

### 3 Règles de combinaison

#### 3.1 Hypothèse d'un monde fermé : règle de Dempster-Shafer

La règle de combinaison de Dempster-Shafer (DS) (Shafer, 1976) correspond à une règle conjonctive normalisée de fonctions de masses de croyance. Il s'agit de considérer des intersections ( $\cap$ ) entre sous-ensembles de  $2^\Theta$ , correspondant au « ET » logique entre plusieurs propositions. Cette règle permet en effet le transfert de masse de croyance sur des sous-ensembles de cardinalité inférieure. Les  $s$  sources d'information sont considérées distinctes et indépendantes et sont respectivement caractérisées par des fonctions de masses de croyances  $m_i(\cdot)$ , avec  $i = 1, 2, \dots, s$ . La combinaison de DS fait l'hypothèse d'un monde fermé, c'est-à-dire que le conflit entre sources n'est pas une solution admissible,  $m_{1,2,\dots,s}^{DS}(\emptyset) = 0$ , avec  $m_{1,2,\dots,s}^{DS}$  la masse de croyance après combinaison de DS à partir de  $s$  sources d'information. Pour tout  $X_i \in 2^\Theta \setminus \{\emptyset\}$  :

$$m_{1,2,\dots,s}^{DS}(X) = \frac{1}{1 - m_{1,2,\dots,s}(\emptyset)} \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_s \in 2^\Theta \\ X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_s = X}} \prod_{i=1}^s m_i(X_i) \quad (\text{II.1})$$

Avec le degré de conflit entre les  $s$  sources d'information considérées qui est représenté par :

$$m_{1,2,\dots,s}(\emptyset) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_s \in 2^\Theta \\ X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_s = \emptyset}} \prod_{i=1}^s m_i(X_i) \quad (\text{II.2})$$

Lorsque  $m_{1,2,\dots,s}(\emptyset) = 1$  les sources sont en conflit total et la règle de Dempster-Shafer ne peut s'appliquer car elle n'est plus correctement définie (cf. Eq II.1). La règle de DS est associative et commutative. Dans le cadre de cette règle de combinaison, l'élément neutre est la masse de croyance vide, ce qui signifie qu'une source d'information complètement ignorante n'impactera pas le résultat de la fusion et la masse de croyance à l'issue de la fusion sera égale à la masse de croyance fixée par la source d'information non ignorante. La règle de combinaison de DS propose donc de quantifier le conflit entre les sources d'information et de le répartir sur les autres hypothèses, proportionnellement à leurs masses, de sorte à le rapporter à 0 mais à respecter le principe  $\sum_{X_1, X_2, \dots, X_s \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ .

Spécifiquement pour  $s = 2$  sources d'information, la masse issue de la combinaison de DS s'exprime :

$$m_{1,2}^{DS}(X) = \frac{1}{1 - m_{1,2}(\emptyset)} \sum_{\substack{X_1, X_2 \in 2^\Theta \\ X_1 \cap X_2 = X}} m_1(X_1)m_2(X_2) \quad (\text{II.3})$$

Avec le degré de conflit entre les deux sources défini comme étant :

$$m_{1,2}(\emptyset) = \sum_{\substack{X_1, X_2 \in 2^\Theta \\ X_1 \cap X_2 = \emptyset}} m_1(X_1)m_2(X_2) \quad (\text{II.4})$$

### 3.2 Hypothèse d'un monde ouvert de Smets

Contrairement à la règle de combinaison de DS faisant l'hypothèse d'un monde fermé, Smets (1990) fait l'hypothèse d'un monde ouvert avec son Transferable Belief Model (TBM). Il s'agit donc ici de laisser la masse de croyance affectée au conflit  $\emptyset$ , déterminée par Eq II.2, et de considérer que les hypothèses constitutives de  $\Theta$  ne sont pas exhaustives. Dans cette hypothèse d'un monde ouvert, avec  $s$  sources d'information, nous avons ainsi  $m_{1,2,\dots,s}(\emptyset) > 0$ . La masse de croyance issue d'une telle règle de combinaison s'obtient donc par :

$$m_{1,2,\dots,s}(X) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_s \in 2^\Theta \\ X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_s = X}} \prod_{i=1}^s m_i(X_i) \quad (\text{II.5})$$

Avec  $m_{1,2,\dots,s}(\emptyset)$  défini par Eq II.2. Spécifiquement, pour  $s = 2$  sources d'information, la masse issue du processus de fusion s'écrit alors :

$$m_{1,2}(X) = \sum_{\substack{X_1, X_2 \in 2^\Theta \\ X_1 \cap X_2 = X}} m_1(X_1)m_2(X_2) \quad (\text{II.6})$$

*Note : Smets (1993) et d'autres auteurs (Dubois and Prade, 2008), ont également proposé des règles de combinaison disjonctives. Il s'agit alors de considérer des unions ( $\cup$ ) entre sous-ensembles de  $2^\Theta$ , correspondant au « OU » logique entre plusieurs hypothèses de  $\Theta$ . Ces règles sont dites « conservatrices » puisqu'elles transfèrent les masses de croyance sur des sur-ensembles de cardinalité supérieure. Elles considèrent qu'au moins une des sources d'information est fiable là où les règles de combinaison conjonctives considèrent toutes les sources d'information comme fiables. Nous jugeons ces règles disjonctives trop conservatrices pour notre problématique et nous ne les considérerons pas dans la suite de ce travail puisque l'ensemble de nos sources d'information (géophysiques et géotechniques) sont jugées comme fiables, bien que leurs informations soient entachées de plus ou moins d'imperfection.*

### 3.3 Règle de PCR6, Proportional Conflict Redistribution rule no 6

Dans l'hypothèse d'un monde fermé, la validité de la règle de combinaison de Dempster-Shafer a été remise en question par plusieurs auteurs. En effet, la normalisation appliquée peut être parfois mise en difficulté. Ce point particulier fait par ailleurs l'objet d'une section dédiée, Section 5 de cette partie.

Pour pallier les défauts de la normalisation de DS, une règle de fusion reposant sur une redistribution proportionnelle du conflit (Proportional Conflict Redistribution rule no 6 - PCR6) a été proposée par Martin and Osswald (2006), toujours dans l'hypothèse d'un monde fermé, tel que  $m_{1,2,\dots,s}^{PCR6}(\emptyset) = 0$ . Le principe de la règle consiste à i) appliquer la règle de combinaison conjonctive, ii) calculer les masses des conflits partiels ou totaux, iii) répartir les masses conflictuelles sur les ensembles du cadre de discernement, proportionnellement à l'implication de ces ensembles dans les conflits.

L'écriture mathématique de PCR6 proposée par Martin and Osswald (2006) étant complexe, nous reprenons ici l'écriture proposée par Smarandache and Dezert (2013). La règle de PCR6, pour  $s$  sources d'information et pour tout  $X \in 2^\Theta \setminus \{\emptyset\}$ , peut s'écrire :

$$m_{1,2,\dots,s}^{PCR6}(X) = m_{1,2,\dots,s}(X) + \sum_{k=1}^{s-1} \sum_{\substack{X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_k} \in 2^\Theta \setminus X \\ (\bigcap_{j=1}^k X_{i_j}) \cap X = \emptyset}} \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_k) \in P^s(\{1, 2, \dots, s\})} [m_{i_1}(X) + m_{i_2}(X) + \dots + m_{i_k}(X)] \cdot \frac{m_{i_1}(X) \dots m_{i_k}(X) m_{i_{k+1}}(X_{i_{k+1}}) \dots m_{i_s}(X_{i_s})}{m_{i_1}(X) + \dots + m_{i_k}(X) + m_{i_{k+1}}(X_{i_{k+1}}) + \dots + m_{i_s}(X_{i_s})} \quad (\text{II.7})$$

Avec  $P^s(\{1, 2, \dots, s\})$  comme étant l'ensemble des permutations des éléments  $1, 2, \dots, s$ . Il s'agit d'appuyer sur le fait que  $X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_s}$  peuvent être différents les uns des autres, ou certains égaux.

Spécifiquement, pour  $s = 2$  sources d'information, l'écriture est plus simple et devient :

$$m_{1,2}^{PCR6}(X) = m_{1,2}(X) + \sum_{\substack{Y \in 2^\Theta \\ X \cap Y = \emptyset}} \left[ \frac{m_1(X)^2 m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} + \frac{m_2(X)^2 m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right] \quad (\text{II.8})$$

#### 4 Exemple illustratif de l'application des règles de combinaison

Considérons deux sources d'information distinctes (qui pourraient être des sources d'informations géophysiques et géotechniques) et un cadre de discernement limité contenant deux hypothèses  $A$  et  $B$ , c'est à dire que  $\Theta = \{A, B\}$ . Le powerset de  $\Theta$  s'écrit donc  $2^\Theta = \{\emptyset, A, B, A \cup B\}$ . Chacune des sources évalue son degré de croyance en chacune des hypothèses possibles, ces valeurs sont renseignées Table II.1, pour chacune des sources, en respectant  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ , avec  $i \in \{1, 2\}$ .

TABLE II.1 – Masses de croyance attribuées à chacune des hypothèses pour les sources d'information n° 1 et 2.

	$A$	$B$	$A \cup B$	$\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i)$
$m_1(\cdot)$	0.5	0.3	0.2	1
$m_2(\cdot)$	0.1	0.1	0.8	1

Dans cet exemple, la source n° 1 a un degré de croyance plus important sur l'hypothèse  $A$  ( $m_1(A) = 0.5$ ) mais garde tout de même quelques réserves ( $m_1(B) = 0.3$  et  $m_1(A \cup B) = 0.2$ ). La source n° 2 est en revanche très ignorante puisque la plus grande masse est attribuée à l'union des hypothèses (i.e. l'une OU l'autre, incertitude) ( $m_2(A \cup B) = 0.8$ ) et le reste est réparti équitablement, avec  $m_2(A) = m_2(B) = 0.1$ .

Sachant que les hypothèses du cadre de discernement sont exclusives et exhaustives et que la combinaison conjonctive permet le transfert des masses sur les sous-ensembles de cardinalité inférieure, nous présentons Table II.2 les intersections des hypothèses considérées dans notre exemple. Ce tableau permet d'aider à la compréhension de la répartition des masses.

TABLE II.2 – Intersections des différentes hypothèses considérées.

$\cap$	$A$	$B$	$A \cup B$
$A$	$A$	$\emptyset$	$A$
$B$	$\emptyset$	$B$	$B$
$A \cup B$	$A$	$B$	$A \cup B$

Dans un premier temps, faisons l'hypothèse d'un monde ouvert, tel que le propose Smets, afin de calculer les masses de croyance combinées en utilisant Eq II.6. Ainsi :

$$\begin{aligned}
 m_{1,2}(A) &= m_1(A)m_2(A) + m_1(A \cup B)m_2(A) + m_1(A)m_2(A \cup B) \\
 m_{1,2}(B) &= m_1(B)m_2(B) + m_1(A \cup B)m_2(B) + m_1(B)m_2(A \cup B) \\
 m_{1,2}(A \cup B) &= m_1(A \cup B)m_2(A \cup B) \\
 m_{1,2}(\emptyset) &= m_1(A)m_2(B) + m_1(B)m_2(A)
 \end{aligned}$$

Grâce à la masse conflictuelle déterminée ( $m_{1,2}(\emptyset)$ ), il est possible de réaliser les normalisations de Dempster-Shafer et de PCR6, faisant l'hypothèse d'un monde fermé. Ainsi pour la normalisation de Dempster-Shafer en utilisant Eq II.3 :

$$\begin{aligned}
 m_{1,2}^{DS}(A) &= \frac{m_{1,2}(A)}{1 - m_{1,2}(\emptyset)} \\
 m_{1,2}^{DS}(B) &= \frac{m_{1,2}(B)}{1 - m_{1,2}(\emptyset)} \\
 m_{1,2}^{DS}(A \cup B) &= \frac{m_{1,2}(A \cup B)}{1 - m_{1,2}(\emptyset)}
 \end{aligned}$$

Et pour la normalisation de PCR6 en utilisant Eq II.8 :

$$\begin{aligned}
 m_{1,2}^{PCR6}(A) &= m_{1,2}(A) + \frac{m_1(A)^2 m_2(B)}{m_1(A) + m_2(B)} + \frac{m_2(A)^2 m_1(B)}{m_2(A) + m_1(B)} \\
 m_{1,2}^{PCR6}(B) &= m_{1,2}(B) + \frac{m_1(B)^2 m_2(A)}{m_1(B) + m_2(A)} + \frac{m_2(B)^2 m_1(A)}{m_2(B) + m_1(A)} \\
 m_{1,2}^{PCR6}(A \cup B) &= m_{1,2}(A \cup B)
 \end{aligned}$$

Les résultats présentés Table II.3, mettent en évidence la capacité de l'hypothèse du monde ouvert à quantifier le niveau de conflit ainsi que la capacité des normalisations de DS et PCR6 à répartir cette masse conflictuelle. Pour l'ensemble des trois règles de combinaison retenues, l'hypothèse  $A$  est l'hypothèse obtenant la plus grande masse de croyance associée. Les résultats issus de la normalisation de DS et de PCR6 sont très proches, bien que PCR6 octroie une masse légèrement plus importante sur  $A$  que la règle de DS qui l'octroie sur le doute  $A \cup B$ . Le conflit est peu important sur un tel exemple et ce cas est non problématique.

TABLE II.3 – Masses de croyances combinées issues des trois règles de combinaison retenues.

	$A$	$B$	$A \cup B$	$\emptyset$
$m_{1,2}(\cdot)$	0.47	0.29	0.16	0.08
$m_{1,2}^{DS}(\cdot)$	0.51	0.32	0.17	0
$m_{1,2}^{PCR6}(\cdot)$	0.52	0.32	0.16	0

## 5 Mise en difficulté de la règle de combinaison de Dempster-Shafer

Bien que très employée, la règle de combinaison de Dempster-Shafer peut être mise en difficulté dans certains cas de figure. En effet, la validité de la règle de combinaison de Dempster-Shafer a été discutée très tôt par Zadeh (1979, 1984), qui souligne l'aberration de certains résultats en considérant deux sources d'information très conflictuelles. Nous l'illustrons ici avec un exemple : considérons deux sources d'information distinctes et un cadre de discernement contenant trois hypothèses  $A$ ,  $B$  et  $C$ , c'est à dire que  $\Theta = \{A, B, C\}$ . Le powerset de  $\Theta$  s'écrit donc  $2^\Theta = \{\emptyset, A, B, A \cup B, C, A \cup C, B \cup C, A \cup B \cup C\}$ . Chacune des sources évalue son degré de croyance en chacune des hypothèses. Les masses de croyance considérées sont ici **bayésiennes** et leurs valeurs sont renseignées Table II.4, en respectant  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ , avec  $i \in \{1, 2\}$ .

TABLE II.4 – Masses de croyance attribuées à chacune des hypothèses pour les sources d'information n° 1 et 2.

	$A$	$B$	$C$	$\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i)$
$m_1(\cdot)$	0.99	0	0.01	1
$m_2(\cdot)$	0	0.99	0.01	1

La source d'information n° 1 attribue un degré de croyance très important à l'hypothèse  $A$  ( $m_1(A) = 0.99$ ) et une masse de croyance nulle à l'hypothèse  $B$ . Inversement, la source d'information n° 2 attribue un degré de croyance très important à l'hypothèse  $B$  ( $m_2(B) = 0.99$ ) et une masse de croyance nulle à l'hypothèse  $A$ . Les deux sources octroient une masse de croyance infime à l'hypothèse  $C$  ( $m_1(C) = m_2(C) = 0.01$ ). Afin d'aider à la compréhension de la répartition des masses, la Table II.5 présente les intersections des hypothèses considérées dans notre exemple.

TABLE II.5 – Intersections des différentes hypothèses considérées.

$\cap$	$A$	$B$	$C$
$A$	$A$	$\emptyset$	$\emptyset$
$B$	$\emptyset$	$B$	$\emptyset$
$C$	$\emptyset$	$\emptyset$	$C$

Les résultats issus des trois règles de combinaison introduites sont présentés dans la Table II.6.

TABLE II.6 – Masses de croyances combinées issues des trois règles de combinaison retenues.

	$A$	$B$	$C$	$\emptyset$
$m_{1,2}(\cdot)$	0	0	$10^{-4}$	$\simeq 1$
$m_{1,2}^{DS}(\cdot)$	0	0	1	0
$m_{1,2}^{PCR6}(\cdot)$	$\simeq 0.5$	$\simeq 0.5$	$\simeq 3.10^{-4}$	0

L'hypothèse d'un monde ouvert (hypothèse faite par Smets) met en évidence le très haut de niveau de conflit existant entre les deux sources d'information et accorde des masses nulles aux hypothèses  $A$  et  $B$  pourtant respectivement créditées de 0.99 par chacune des sources. La normalisation de Dempster-Shafer ne vient cependant pas répartir correctement le conflit puisque à l'issue de la combinaison, la confiance semble absolue sur l'hypothèse  $C$  pourtant associée à une masse de croyance de seulement 0.01 par chacune des sources. Les hypothèses  $A$  et  $B$  semblent devenues impossibles. Cet exemple, bien que très spécifique et non nécessairement représentatif de la majorité des cas de figure, illustre l'intérêt d'utiliser une autre forme de répartition du conflit, comme le propose PCR6. Cette règle de combinaison permet alors d'obtenir un résultat plus intuitif, avec des masses équivalentes, proches de 0.5 associées aux hypothèses  $A$  et  $B$ .

## 6 Utilisation dans le domaine des géosciences

A notre connaissance, la théorie des masses de croyance a rarement été employée dans le domaine des géosciences et nous n'avons pas rencontré de littérature traitant de la fusion d'informations géophysiques et géotechniques. Cependant, nous présentons ici deux exemples de travaux proposant la combinaison d'informations issues de différentes sources dans le cadre de la théorie des masses de croyance et dans le domaine des géosciences.

### 6.1 Risques de glissements de terrain

Tangestani (2009) s'appuie sur la théorie des masses de croyance avec utilisation de la règle de combinaison de Dempster-Shafer pour proposer une cartographie des risques de glissements de terrain dans une région située dans l'Ouest de l'Iran (Figure II.1).

Différents facteurs de risques de glissements ont été considérés : la lithologie, l'angle de pente, l'aspect de la pente, la couverture végétale, la profondeur de sol. Les cartes représentatives des différents facteurs et des masses de croyance associées subjectivement ont été entrées dans un SIG (système d'informations géographiques) puis combinées entre elles afin de proposer une carte évaluant le risque de glissement de terrains (Figure II.1). Les cartes issues du processus de fusion ont ensuite été

évaluées sur la base de glissements de terrain connus et les résultats ne s'avèrent que peu concluants. Les auteurs imputent la mauvaise qualité de leurs résultats à l'attribution des masses de croyance réalisée à partir des fonctions d'appartenance floue ainsi qu'au niveau de conflit présent entre les sources d'information, induisant à des résultats contre-intuitifs par l'utilisation de la règle de combinaison de DS.

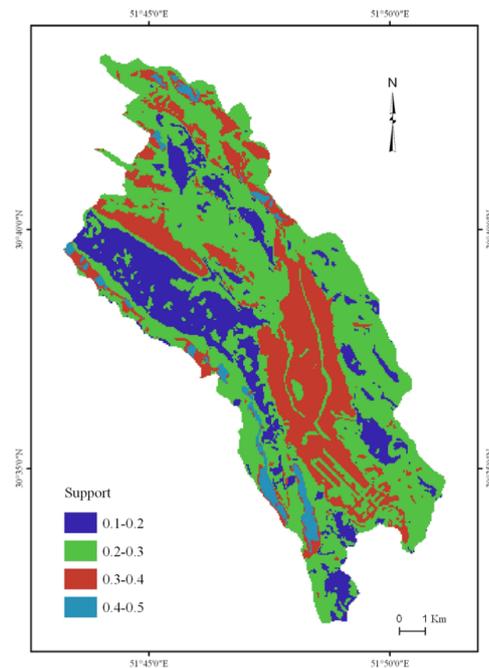


FIGURE II.1 – Valeurs de masses de croyance, issues de la règle de combinaison de Dempster-Shafer, pour cartographier les risques de glissements de terrain dans l'Ouest de l'Iran, d'après Tangestani (2009).

## 6.2 Potentiel et qualité des eaux souterraines

Rahmati and Melesse (2016) considèrent le cadre de réflexion de la théorie des masses de croyance pour évaluer le potentiel des eaux souterraines dans l'Ouest de l'Iran ainsi que pour évaluer le niveau de risque de pollution aux nitrates de ces réservoirs. Des SIG sont également utilisés afin de compiler les différents jeux de données et de créer des cartes de facteurs de quantité et de qualité des eaux souterraines. Les facteurs suivants sont considérés : lithologie, utilisation des sols, nature du sol, altitude, angle de pente, distance au cours d'eau, densité de rivière, indice d'humidité topographique, densité de linéaments ainsi que le niveau de nitrate dans plusieurs puits d'extraction. Des degrés de crédibilités (belief) et plausibilités (plausibility) sont déterminés à l'issue de la règle de combinaison de DS (Figure II.2), en se basant sur les relations proposées par Carranza and Hale (2003), permettant d'encadrer des distributions de probabilités. Les performances de la méthodologie ont été évaluées à l'aide de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) et des données d'essais de pompage : le potentiel en eaux souterraines déterminé par la règle de combinaison de DS est associé à une exactitude de 87.76 %.

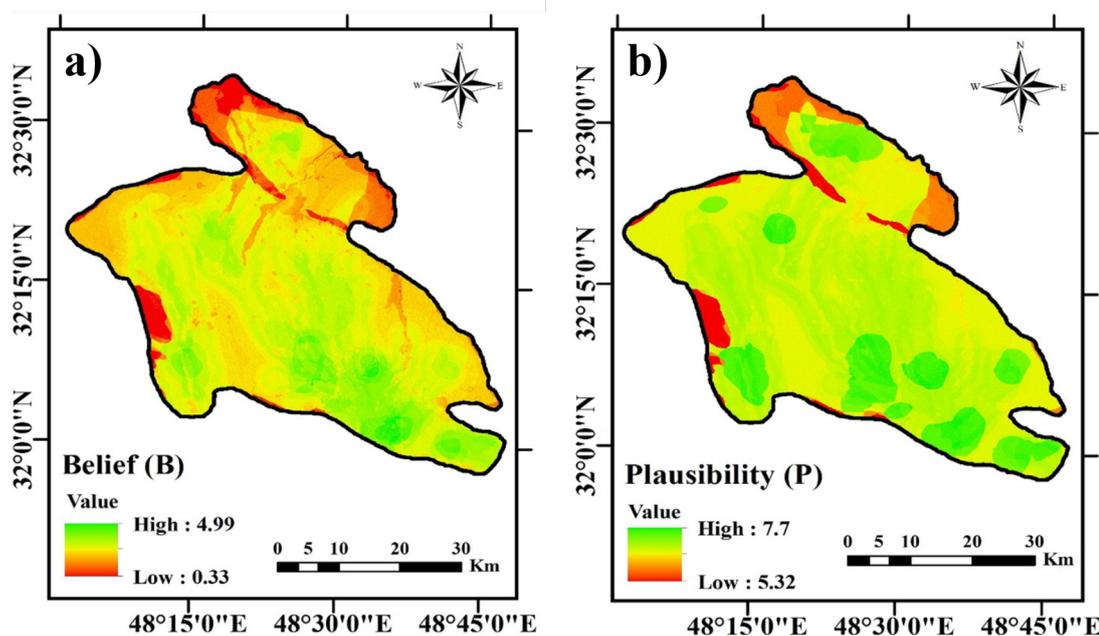


FIGURE II.2 – Potentiel en eaux souterraines sous forme de fonctions de a) crédibilité et de b) plausibilité dans l’Ouest de l’Iran, après combinaison de DS, d’après Rahmati and Melesse (2016).

## 7 Conclusion

Dans cette première partie, dédiée à la présentation de la théorie des masses de croyance, nous avons pu mettre en avant l’approche proposée par ce cadre de réflexion pour représenter des informations imparfaites. Trois règles de combinaison de l’information ont ensuite été introduites et présentées en détail avec des exemples illustratifs permettant de faire ressortir les intérêts et atouts d’une telle approche, notamment par rapport à un cadre probabiliste traditionnel.

L’hypothèse d’un monde ouvert faite par Smets permet d’octroyer une masse de croyance à l’issue de la fusion et de visualiser le degré de conflit existant entre les sources d’information. L’hypothèse d’un monde fermé, considérée par la règle de combinaison de Dempster-Shafer, répartit ce conflit sur les autres masses des hypothèses considérés. Cette normalisation peut cependant s’avérer problématique dans certains cas présentant un haut niveau de conflit entre les sources d’information. La règle de PCR6, répartissant la masse du conflit proportionnellement aux masses des hypothèses impliquées dans du conflit, doit alors être privilégiée. Dans la suite de ce travail de thèse, nous choisissons de considérer ces trois règles de combinaison lors du développement de notre méthodologie afin de pouvoir comparer les différents résultats obtenus.

Après avoir évoqué dans cette fin de partie deux exemples de travaux utilisant une approche reposant sur les masses de croyance dans le domaine des géosciences, nous détaillerons dans la **Partie B** notre méthodologie de fusion développée pour

la combinaison de données issues de sources géophysiques et géotechniques, pour la reconnaissance de digues de protection fluviale.

# Partie B

## Méthodologie de fusion développée

### 1 Introduction

Après avoir détaillé la théorie des masses de croyance dans la partie précédente, attardons-nous dans cette partie à la méthodologie de fusion que nous proposons. Dans le cadre de notre problématique, nous souhaitons combiner des informations issues de sources d'informations géotechniques et géophysiques afin de proposer une représentation 2D des matériaux constitutifs d'un ouvrage hydraulique en terre, avec degrés de confiance associés. L'approche de la théorie des masses de croyance ayant été retenue, il s'agit alors de proposer une méthodologie permettant la fusion d'informations acquises par au moins deux sources distinctes. Ces sources proposant des données imparfaites avec des distributions spatiales qui leur sont propres (informations spatialisées pour les données géophysiques et ponctuelles pour les données géotechniques), il s'agira d'être capable d'en tenir compte.

Le schéma, présentant les grandes étapes d'une telle méthodologie, est introduit Figure II.3. La réflexion débute par une section initiale du modèle considéré (Section B.2), qu'il s'agira de caractériser au mieux à l'issue de notre démarche. Pour ce faire, des acquisitions géophysiques (Section B.3.1) et géotechniques (Section B.4.2) doivent avoir lieu, permettant d'acquérir des jeux de données, entachées d'imperfections, renseignant sur des valeurs de paramètres physiques.

Une fois ces informations acquises, il est nécessaire de construire des fonctions de masses de croyance renseignant les valeurs associées aux différentes hypothèses constitutives du cadre de discernement,  $\Theta$ , considérées par l'utilisateur (Sections B.3.4 et B.4.5). Ces jeux de masses sont propres à chaque source d'information et sont associés à chaque maille de la grille, représentative de la section de sous-sol.

Du fait des répartitions spatiales de l'information, spécifiques à chaque source, les dimensions des zones couvertes par la géophysique et la géotechnique peuvent être différentes et la discrétisation de ces zones est propre à chaque source d'information. Une étape de superposition des maillages doit avoir lieu afin de travailler sur un objet de dimensions et de discrétisation identiques (Partie B.5), permettant d'opérer le processus de fusion à proprement parler, réalisé en suivant les trois règles de combinaison introduites précédemment (Partie B.6). Cette dernière section présentera nos choix en matière de représentation des résultats.

Au sein de cette partie, chaque étape de ce schéma sera reprise, détaillée et illustrée afin que le lecteur puisse saisir le déroulement de notre démarche de fusion, utilisée dans les trois prochains chapitres de ce manuscrit.

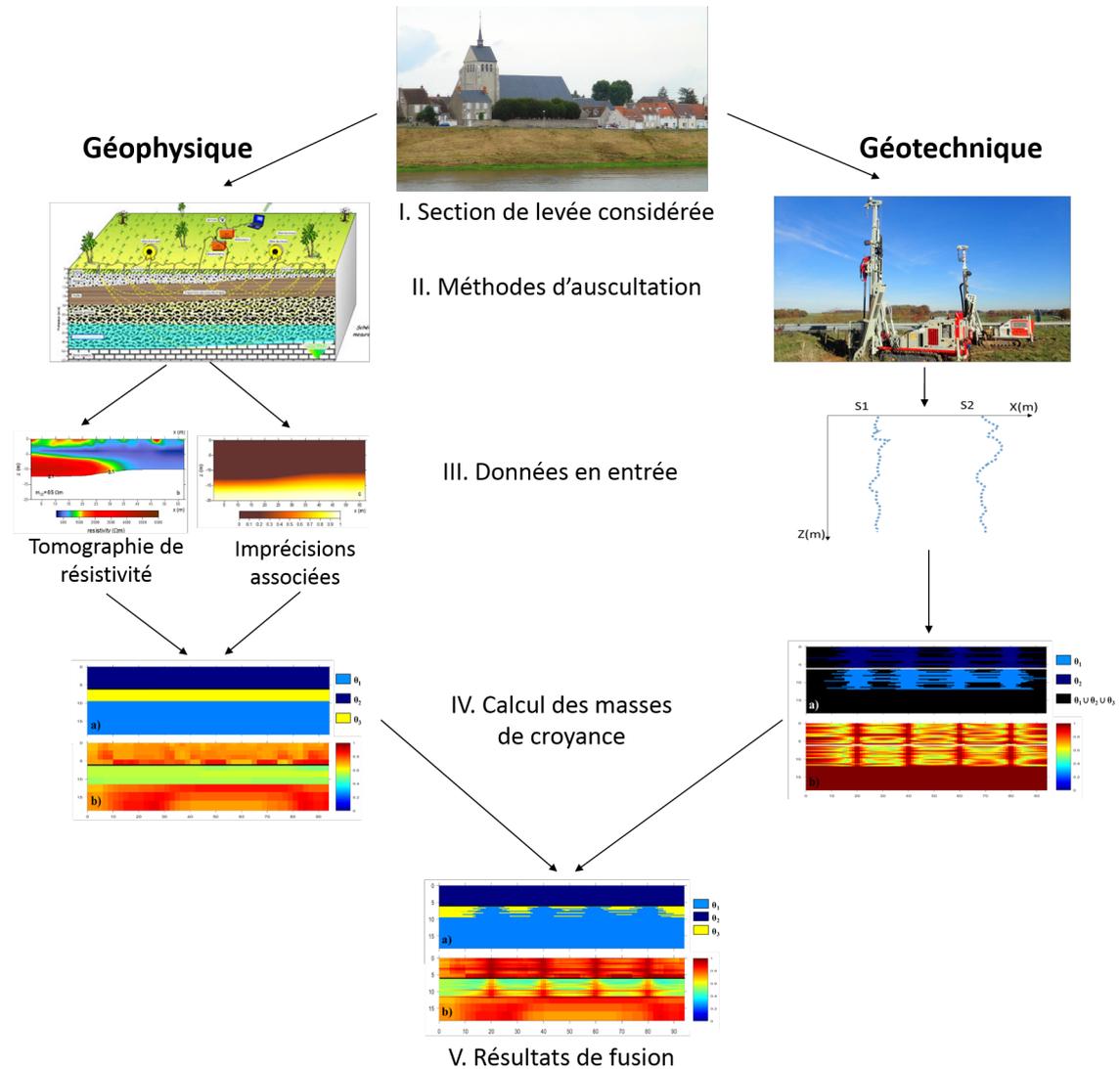


FIGURE II.3 – Représentation des étapes de la méthodologie de fusion développée, depuis la section initiale de digue considérée jusqu'à sa représentation finale avec masses de croyance correspondantes.

## 2 Modèle considéré et cadre de discernement

Afin de présenter la méthodologie de fusion développée, nous faisons le choix de considérer un modèle 2D simple à identifier. Il s'agit d'une section de sous-sol de 94 m de long, assimilable à une section longitudinale d'un ouvrage hydraulique, composée de deux matériaux. Afin de s'approcher légèrement d'un modèle de digue de protection fluviale, nous choisissons de considérer un matériau fin de type « argiles » en profondeur, faisant office de substratum imperméable, surmonté d'un matériau plus grossier (sableux) sur 6 mètres d'épaisseur (Figure II.4). L'interface entre les deux matériaux est **nette** et **horizontale**, plutôt éloignée de ce qui peut être rencontré dans la réalité. La profondeur d'investigation des méthodes utilisées étant de 17 m maximum, nous ne considérerons pas la partie sous-jacente.

Afin de travailler dans le cadre de la théorie des masses de croyance, il s'agit de définir un cadre de discernement,  $\Theta$ . Nous formulons, comme solutions possibles au problème posé, trois hypothèses :

- l'hypothèse  $\theta_1$ , le matériau géologique est fin, types « argiles »,
- l'hypothèse  $\theta_2$ , le matériau géologique est grossier, type « sables »,
- l'hypothèse  $\theta_3$ , le matériau géologique est autre.

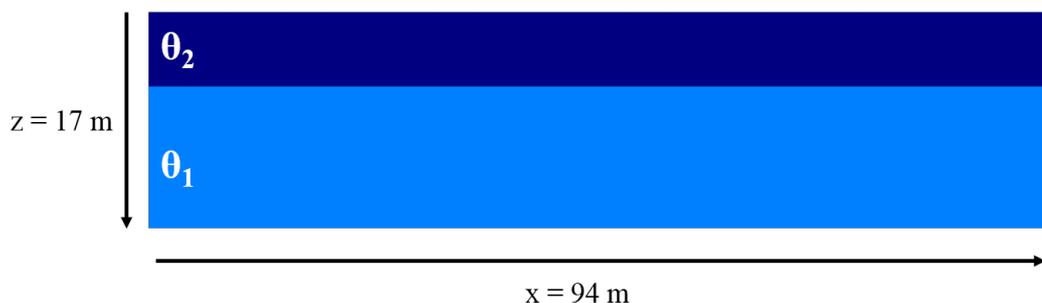


FIGURE II.4 – Représentation de la section bicouche de sous-sol considérée, constituée d'un matériau fin ( $\theta_1$ ) surmonté d'un matériau plus grossier ( $\theta_2$ ).

L'hypothèse  $\theta_3$  n'étant pas présente dans le modèle initial considéré (Figure II.4), la solution post-fusion idéale ne devrait pas présenter ce matériau. Cependant, dans un cas réel, lors d'une campagne de reconnaissance sur site, les matériaux exacts constitutifs du sous-sol ne sont pas nécessairement tous connus. Cette hypothèse supplémentaire permet de prévenir en cas de présence de matériau non caractérisé par les autres hypothèses considérées. Il peut donc s'agir d'un matériau autre, ou encore d'un mélange des matériaux considérés par les hypothèses  $\theta_1$  et  $\theta_2$  mais présentant des propriétés physiques dont les valeurs sont en-dehors des classes associées à ces hypothèses (cf Section B.3.3 et Section B.4.1). Dans cet exemple, le cadre de discernement  $\Theta$  s'écrit donc :

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} \quad (\text{II.9})$$

Et le powerset de  $\Theta$ , noté  $2^\Theta$  :

$$2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2, \theta_3, \theta_1 \cup \theta_3, \theta_2 \cup \theta_3, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3\} \quad (\text{II.10})$$

### 3 Construction de masses de croyance à partir de données géophysiques

Dans le cadre de cet exemple, et plus généralement de ce travail de thèse, nous considérons la méthode de tomographie de résistivité électrique (TRE) comme méthode de reconnaissance géophysique. Cette méthode reconnue pertinente pour la

reconnaissance des ouvrages hydrauliques (Dezert et al., 2019a) fait par ailleurs l'objet d'une présentation (Chapitre I, Section A.3.1) mettant en avant les atouts d'une telle méthode d'investigation pour la caractérisation des digues de protection fluviale.

### 3.1 Construction d'un modèle géoélectrique et simulation d'acquisitions

Afin de simuler une acquisition électrique comme elle pourrait être effectuée sur site, nous considérons d'abord le modèle présenté Figure II.5, construit à l'aide du logiciel libre Res2Dmod (Loke, 2002). Les valeurs de résistivités électriques sont fixées à 1 000  $\Omega.m$  pour le matériau grossier et à 10  $\Omega.m$  pour le matériau fin sous-jacent, inspirées des valeurs proposées par Palacky (1988), Figure II.6.

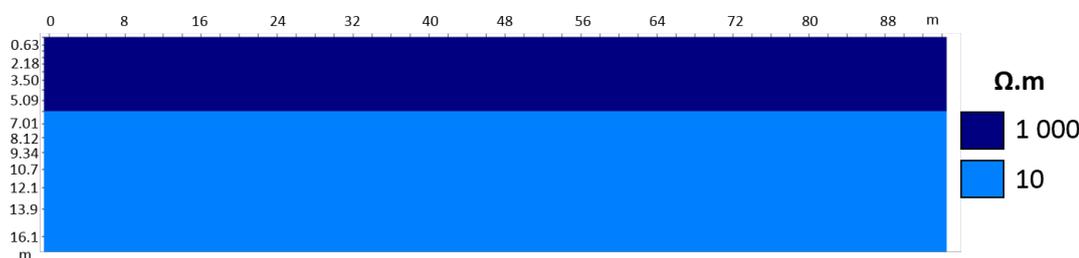


FIGURE II.5 – Modèle géoélectrique bi-couche considéré.

Une fois le modèle de résistivité de sous-sol construit, nous simulons une acquisition de TRE. 48 électrodes espacées de 2 mètres (profil de 94 mètres de long) sont ici considérées, avec une acquisition selon une configuration **Wenner**, et des données bruitées à hauteur de 5 %. La configuration Wenner est classiquement utilisée et est recommandée pour la caractérisation de structures tabulaires, souvent rencontrées sur les digues.

Suite à l'injection d'un courant d'intensité connue, les lignes de courant sont réparties dans l'ensemble du volume de sous-sol, permettant de caractériser la distribution (latérale et verticale) de résistivité. Les différences de potentiel mesurées entre les différents couples d'électrodes considérés permettent de déterminer des valeurs de résistivités apparentes  $\rho_a$ , à distinguer des résistivités vraies :

$$\rho_a = \rho_0 \frac{R_{mes}}{R_0} \quad (\text{II.11})$$

$\rho_a$  correspond ainsi au rapport entre la différence de potentiel obtenue sur site avec un montage et une intensité connus et celle qui serait obtenue avec un montage identique et pour une même intensité de courant, en se plaçant sur un sous-sol homogène, isotrope, de résistivité  $\rho_0$  [ $\Omega.m$ ].  $R_{mes}$  [ $\Omega$ ] correspond à la résistance de transfert mesurée et  $R_0$  [ $\Omega$ ] à la résistance de transfert simulée sur le milieu homogène de résistivité 1  $\Omega.m$ .

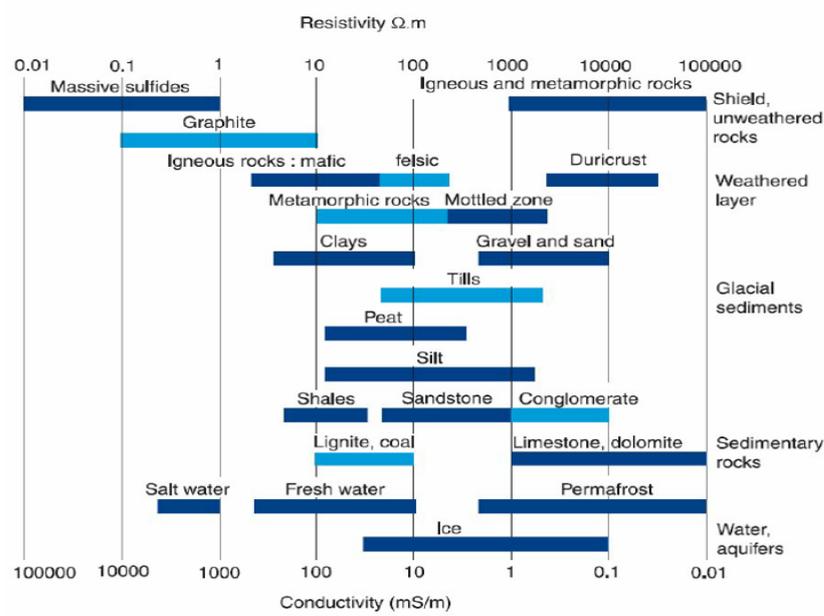


FIGURE II.6 – Gammes de valeurs de résistivités et conductivités pour différents types de matériaux. Les teintes plus claires correspondent aux matériaux pouvant être constitutifs des digues, d'après Palacky (1988).

Le facteur géométrique, noté  $K$ , permet de normaliser la résistivité apparente afin de s'affranchir des effets de la géométrie du milieu (Marescot et al., 2006) :

$$K = \frac{\rho_0}{R_0} \quad (\text{II.12})$$

Pour reconstruire la distribution de résistivités « vraies » au sein de la section depuis les valeurs de  $\rho_a$ , la résolution du problème inverse est requise.

### 3.2 Reconstruction de la subsection de résistivités vraies

La résolution du problème inverse, également appelé processus d'inversion, dans le cas de la tomographie de résistivité électrique, consiste à ajuster un ou plusieurs modèles de sous-sol expliquant au mieux les résistivités apparentes mesurées.

Considérons  $N$  données mesurées ou simulées et l'ensemble des données représentées par le vecteur  $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ . L'objectif de l'inversion est de trouver un modèle  $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T$  à  $M$  paramètres, auquel l'opérateur  $F$  (problème direct) puisse faire correspondre les données  $d$ . Lorsque le problème est linéaire :

$$F(m) = d \quad (\text{II.13})$$

Lorsque le problème inverse est non-linéaire, un processus itératif oblige à considérer un nouveau modèle à chaque itération  $n$ , mise à jour faite par le vecteur perturbation  $\Delta m$ , et en considérant un modèle initial  $m^0$  tel que :

$$m^{n+1} = m^n + \Delta m^n \quad (\text{II.14})$$

Un développement de Taylor au premier ordre permet donc d'écrire :

$$F(m^{n+1}) \approx F(m^n) + S\Delta m^n \quad (\text{II.15})$$

Avec  $S$  la matrice des dérivées de Fréchet, aussi appelée matrice de sensibilité, s'écrivant :

$$S_{ij} = \frac{\partial F(m)}{\partial m} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial m_1} & \frac{\partial d_1}{\partial m_2} & \dots & \frac{\partial d_1}{\partial m_M} \\ \frac{\partial d_2}{\partial m_1} & \dots & \dots & \frac{\partial d_2}{\partial m_M} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial d_N}{\partial m_1} & \dots & \dots & \frac{\partial d_N}{\partial m_M} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La principale équation non quadratique d'inversion s'écrit donc :

$$S\Delta m = d - F(m) \quad (\text{II.17})$$

Cette dernière doit être résolue en minimisant le résidu  $d - F(m)$ . La fonction objectif qui indique la quantité à minimiser, en utilisant une norme  $L_p$  est :

$$\Phi_d(m) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right|^p = \|D(d - f(m))\|_p^p \quad (\text{II.18})$$

Avec  $\epsilon_i$  l'erreur sur la donnée  $d_i$  et  $D = \text{diag}(1/\epsilon_i)$ . Dans notre cas d'étude, nous considérons une inversion suivant une norme L1. Cette inversion est dite robuste. Elle permet de privilégier les contrastes de résistivité entre les ensembles géologiques mais aussi de limiter les effets de données trop bruitées. Nous considérons une méthode de résolution reposant sur un algorithme de type Gauss-Newton qui requiert un développement au second ordre de la fonction objectif (Eq II.18) et permet une convergence rapide. Lors de l'inversion, il s'agit d'avoir en tête qu'il existe une non-unicité des solutions et que les résultats issus d'un tel processus ne correspondent pas complètement à la réalité du sous-sol.

Pour réaliser l'inversion des données de résistivités apparentes, nous utilisons le logiciel commercial Res2Dinv (Loke and Barker, 1996), qui propose une discrétisation de la section sous forme de cellules de largeur constante mais dont la hauteur augmente avec la profondeur (perte de résolution de la méthode avec la profondeur).

Les résultats de l'inversion sont proposés Figure II.7, en considérant le paramétrage « extended model ». Il s'agit d'un des nombreux paramètres mis à disposition dans Res2Dinv, permettant de scinder les cellules par défaut allongées dans les coins, à l'extérieur du trapèze. La section couverte est alors un rectangle de longueur égale à celle du dispositif d'électrodes. Par défaut, pour une représentation classique, le logiciel Res2Dinv utilise des mailles rectangulaires allongées dans les coins inférieurs gauche et inférieurs droit de la section. Ces mailles sont plus allongées afin de contrebalancer la perte d'information en profondeur (ainsi que sur les côtés) inhérente à la méthode. Dans le cadre d'une représentation classique, ces cellules sont toutefois

inversées mais ne sont pas représentées dans le résultat final lissé. Cette discrétisation possède le désavantage (pour notre méthodologie de fusion) d'attribuer une très faible valeur d'imprécision sur les cellules allongées. En conséquence, nous utilisons la discrétisation « extended model ».

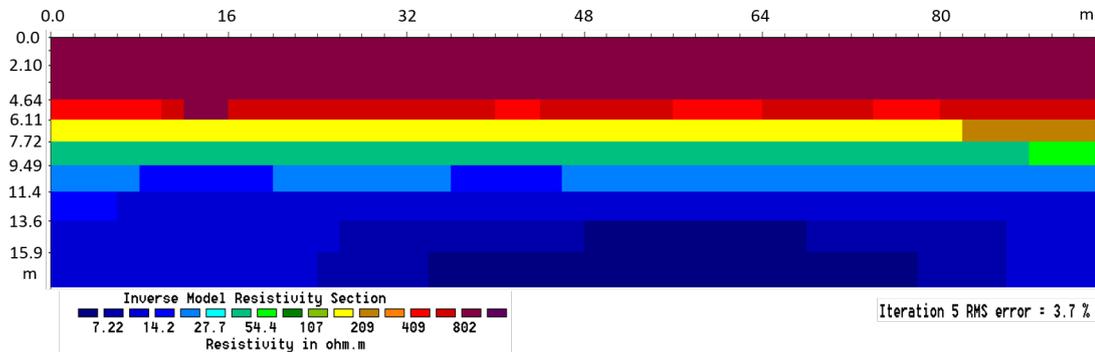


FIGURE II.7 – Section de résistivités inversées.

Cette discrétisation présente l'avantage d'avoir des aires de maille identiques à une profondeur donnée. Cela permet l'attribution de valeurs d'imprécision plus élevées à ces mailles (soulignant donc les fortes imprécisions associées aux mailles présentes dans ces parties du résultat d'inversion).

La possibilité de ne pas utiliser les résultats (résistivités inversées et imprécisions associées) dans les coins, à l'extérieur du trapèze, qui serait proposé sans considérer le paramétrage « extended model », peut néanmoins être sujet à discussion, le courant passant dans ces zones étant minoritaire par rapport aux zones intra-trapèze. Ce choix a cependant été fait i) car la géométrie d'une section rectangulaire permet de simplifier le traitement des données ainsi que leur fusion par rapport à une section trapézoïdale plus complexe, ii) afin d'éviter d'avoir à travailler avec de grandes cellules extra-trapèze ayant des valeurs de sensibilités beaucoup plus importantes et iii) qu'il existe de l'information, bien qu'imprécise, dans les coins de la section. Les imprécisions relativement plus importantes, en lien avec les valeurs de sensibilités et associées aux valeurs extra-trapèze, sont toutefois prises en considération lors du traitement de l'information géophysique. Il s'agit de garder à l'esprit ces considérations lors de l'interprétation des résultats post-fusion. Nous considérons également une représentation sous forme de « model block » afin de mettre en évidence la dimension des mailles qui seront reprises lors du processus de fusion. La représentation « model block » est une représentation directe (sans interpolation graphique) du résultat d'inversion sur le modèle discrétisé.

La figure II.7 fait ressortir, pour un cas simple, la difficulté que rencontre la méthode employée à caractériser précisément la position de l'interface, pourtant franche (Figure II.5), entre les deux types de matériaux. Deux ensembles ressortent cependant correctement à l'issue de l'inversion : un matériau résistif au-dessus et un matériau plus conducteur sous-jacent.

### 3.3 Caractérisation du cadre de discernement

Suite au processus d'inversion réalisé, il est nécessaire de pouvoir associer, pour chaque cellule du modèle discrétisé, les valeurs de résistivités aux trois hypothèses constitutives du cadre de discernement fixé (Eq II.9). Bien que sachant que les valeurs de résistivités associées à l'hypothèse  $\theta_1$  (matériau fin) sont inférieures à celles associées à  $\theta_2$  (matériau grossier), il est possible de visualiser la répartition du nombre de mailles associées à chaque valeur de résistivités, sous forme de distribution en classes modales (Figure II.8), pour préciser les bornes des classes à définir. Cette sélection de bornes est faite à dire d'experts en regroupant les ensembles de classes modales de résistivités proches. Les valeurs de résistivité sont ici représentées en échelle logarithmique.

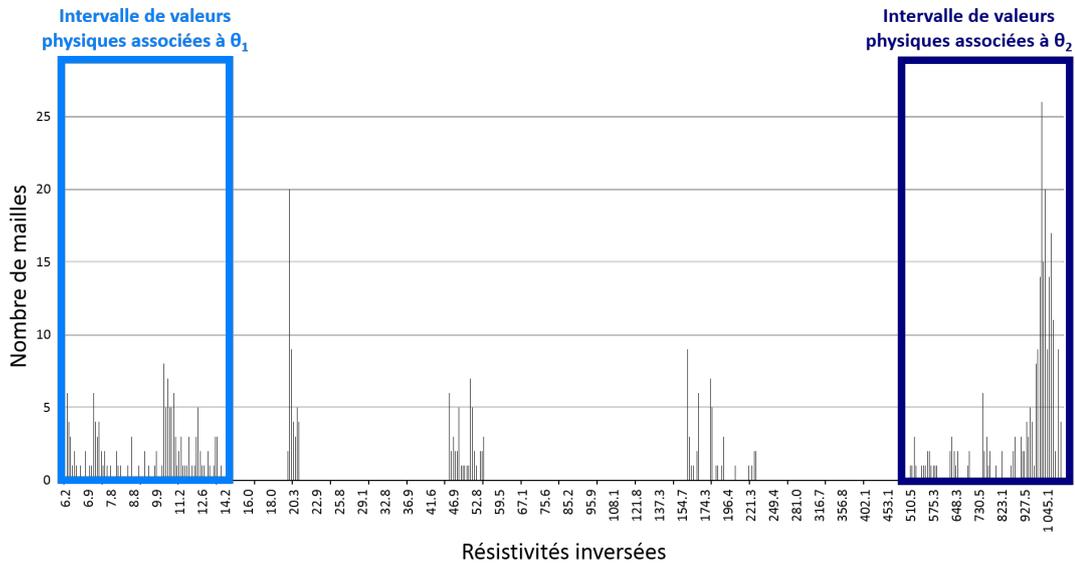


FIGURE II.8 – Distribution sous forme de classes modales des valeurs de résistivités électriques issues de l'inversion permettant de caractériser les valeurs des bornes des intervalles associés aux hypothèses du cadre de discernement  $\Theta$ .

Dans le cadre de l'exemple pris, la Figure II.8 fait ressortir 5 ensembles distincts qu'il est possible d'associer aisément aux ensembles horizontaux visibles Figure II.7. On peut raisonnablement associer la classe de résistivités les plus faibles à l'hypothèse  $\theta_1$  et la classe avec les valeurs les plus grandes à  $\theta_2$ , en faisant le choix d'avoir des classes de « mêmes tailles » en échelle logarithmique. Les chiffres significatifs des valeurs des classes représentées Figure II.8 importent peu dans la méthodologie de caractérisation des bornes et nous sommes conscients que cette précision est superflue pour une interprétation géophysique. C'est en effet la tendance générale de la distribution des valeurs qui doit permettre de mettre en évidence les grands ensembles de matériaux constitutifs du sous-sol. Les classes de valeurs associées aux hypothèses du cadre de discernement pour la méthode de tomographie de résistivité électrique sont donc définies en  $\Omega.m$  comme étant :

[6.15, 14.48] associée à l'hypothèse  $\theta_1$ ,  
[505.5, 1120] associée à l'hypothèse  $\theta_2$ ,  
]14.48, 505.5[ associée à l'hypothèse  $\theta_3$ .

### 3.4 Attribution des masses de croyance

En reprenant la discrétisation de la section issue de l'inversion, il s'agit d'attribuer des masses de croyance sur chaque hypothèse de  $\Theta$  et pour chacune des mailles. Pour ce faire, nous proposons de présenter 5 méthodes d'attribution des masses de croyance, tenant compte des imprécisions sur les résistivités inversées, fournies par Res2DInv à l'issue de l'inversion. Ces imprécisions proviennent du calcul de la matrice de covariance du modèle (Menke, 2018). Alumbaugh and Newman (2000) analysent en détail cette matrice de covariance ; les imprécisions proviennent des éléments diagonaux de  $(S^T S + \lambda W)^{-1}$ . Avec  $\lambda$  un facteur d'amortissement et  $W$  la matrice de lissage utilisée. Au lieu de considérer une valeur de résistivité, il est alors possible de considérer un intervalle de résistivités de borne inférieure  $b_1$  (résistivité calculée moins son imprécision associée) et de borne supérieure  $b_2$  (résistivité calculée plus son imprécision associée). Les résultats issus de ces différentes méthodes d'attribution sont comparés et discutés dans le Chapitre III dédié.

*Note : Dans cet exemple simple d'un bicouche, en considérant deux matériaux dont les valeurs des paramètres géophysiques et géotechniques ne se recoupent pas, les éléments focaux ne sont que des singletons (ici  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$ ), les masses de croyance sont donc Bayésiennes. Ce ne sera pas nécessairement le cas dans l'ensemble du manuscrit où des cas d'intervalles se recoupant pourront être considérés.*

#### 3.4.1 Méthode 1 : distances de Wasserstein

La première méthode que nous considérons repose sur l'utilisation du calcul des distances de Wasserstein telles que proposées par Tran and Duckstein (2002). Il s'agit de calculer les « distances » séparant deux intervalles de résistivités  $A = [a_i, a_{i+1}]$  et  $B = [b_1, b_2]$ , avec  $A$  et  $B$  appartenant à  $\mathbb{R}$ .  $A$  étant l'intervalle associé à une hypothèse du cadre de discernement et  $B$  un intervalle de résistivités inversées, tenant compte du niveau d'imprécision (illustration en rouge Figure II.9). Les distances de Wasserstein sont ici considérées en échelle logarithmique telles que :

$$D_{Wass}(A, B) = \sqrt{\left(\frac{\log(a_i \cdot a_{i+1})}{2} - \frac{\log(b_1 \cdot b_2)}{2}\right)^2 + \frac{1}{3} \left[ \left(\frac{\log(\frac{a_{i+1}}{a_i})}{2}\right)^2 + \left(\frac{\log(\frac{b_2}{b_1})}{2}\right)^2 \right]} \quad (\text{II.19})$$

Ce calcul permet d'estimer la distance entre deux intervalles en fonction de leurs tailles et de la distance séparant leurs bornes. Dans l'exemple illustré Figure II.9, les distances de Wasserstein seraient estimées entre l'intervalle  $[b_1, b_2]$  et chacun des autres intervalles associés aux hypothèses de  $\Theta$  :  $[a_1, a_2]$ ,  $[a_2, a_3]$  et  $[a_3, a_4]$ .

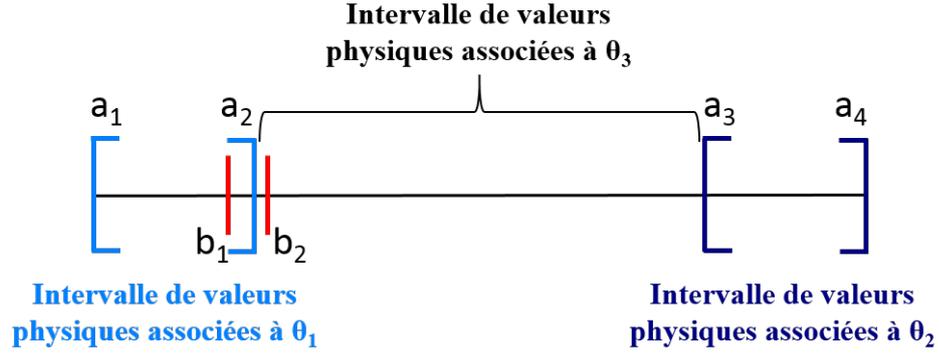


FIGURE II.9 – Schéma présentant, en rouge, l'intervalle de résistivités inversées d'une maille de la section du sous-sol et en bleu, les classes de valeurs associées aux hypothèses de  $\Theta$ . Dans un tel cas, l'hypothèse ayant la masse de croyance la plus importante est  $\theta_1$ .

Chaque maille est alors associée à des fonctions de masses de croyance normalisées, inversement proportionnelles à la valeur de la distance de Wasserstein et en accord avec  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ . Ainsi, plus un intervalle de résistivité électrique inversée est « proche » d'une classe associée à une hypothèse de  $\Theta$  (distance de Wasserstein faible), plus la masse de croyance correspondante est importante, et réciproquement.

### 3.4.2 Méthode 2 : distances de Hausdorff

La deuxième méthode proposée est semblable à la précédente, mais repose sur un calcul différent de distances entre intervalles, il s'agit de la distance de Hausdorff (dont l'origine est imputée au mathématicien Felix Hausdorff), très employée dans le domaine du traitement d'images. En reprenant les notations de la Section 3.4.1, et l'écriture proposée par Gregoire and Bouillot (1998), la distance de Hausdorff entre  $A$  et  $B$  s'écrit :

$$D_H(A, B) = \max(|\log(b_1) - \log(a_i)|, |\log(b_2) - \log(a_{i+1})|) \quad (\text{II.20})$$

Ce calcul retient donc la valeur maximale entre la distance séparant les bornes gauches de  $A$  et  $B$  et la distance séparant leurs bornes droites. Comme pour la première méthode, chaque maille de la section est associée à des fonctions de masses de croyance normalisées, inversement proportionnelles à la valeur de la distance de Hausdorff et en accord avec  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ .

### 3.4.3 Méthode 3 : distances de Wasserstein et classes concernées

Dans certains cas particuliers, par simple considération des distances entre intervalles, la plus grande masse de croyance peut ne pas être attribuée à l'hypothèse associée à la classe de valeurs physiques dans laquelle se trouve l'intervalle de résistivités inversées considéré. En effet, les distances de Wasserstein tenant compte de la

largeur des intervalles, certaines situations à proximité des bornes peuvent donner des résultats contre-intuitifs. Ainsi, un petit intervalle de résistivités,  $X$ , de même taille qu'un intervalle  $A$  mais inclus dans un intervalle  $B$  de dimension beaucoup plus importante et à proximité des bornes, pourrait potentiellement avoir une masse de croyance allouée à l'hypothèse associée à  $B$  plus faible que la masse allouée à l'hypothèse associée à  $A$ . Pour pallier ce biais éventuel, cette troisième méthode propose l'attribution d'office d'une masse de  $m(\cdot) = \frac{1}{2}$  à l'hypothèse associée à la classe de valeurs physiques dans laquelle se trouve l'intervalle de résistivités issu de l'inversion. La masse restante (i.e.  $1/2$ ) est attribuée comme présenté dans la méthode 1, à l'aide des distances de Wasserstein. Cette méthode permet de garantir que l'hypothèse associée à la classe de valeurs physiques dans laquelle se trouve l'intervalle de résistivités sera majoritaire.

Si un intervalle de résistivités  $B$  se retrouve entre deux classes (cf. en rouge Figure II.9), la masse de  $m(\cdot) = \frac{1}{2}$  est répartie proportionnellement sur les deux hypothèses associées aux classes de valeurs physiques concernées, en fonction du taux de recouvrement des classes. Ainsi, dans l'exemple pris, Figure II.9, cette masse est répartie entre l'hypothèse  $\theta_1$  et  $\theta_3$ , avec une plus grande part distribuée sur  $\theta_1$  (imputée à un plus grand recouvrement de l'intervalle de valeurs associé à  $\theta_1$ ). Le reste de la masse est répartie sur les trois hypothèses de  $\Theta$  comme détaillé dans la méthode 1.

#### 3.4.4 Méthode 4 : distances de Wasserstein et aire sous la Gaussienne

Cette méthode d'attribution des masses de croyance est similaire à la méthode 3 présentée plus haut, en cela qu'elle considère la répartition d'une masse de  $m(\cdot) = \frac{1}{2}$  sur l'ensemble des hypothèses de  $\Theta$  au moyen des distances de Wasserstein et la répartition de la masse restante en fonction de la position de l'intervalle de résistivités inversées. En revanche, cette répartition est considérée en fonction de la surface sous la gaussienne d'expression :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{II.21})$$

Avec  $\mu$  la valeur de résistivité inversée et  $\sigma$  l'imprécision associée.

L'intégration est faite en fonction des valeurs des bornes des hypothèses fixées, permettant de répartir une masse de  $m(\cdot) = \frac{1}{2}$  proportionnellement à l'aire sous la gaussienne, sur les hypothèses associées aux intervalles de valeurs physiques concernés (Figure II.10).

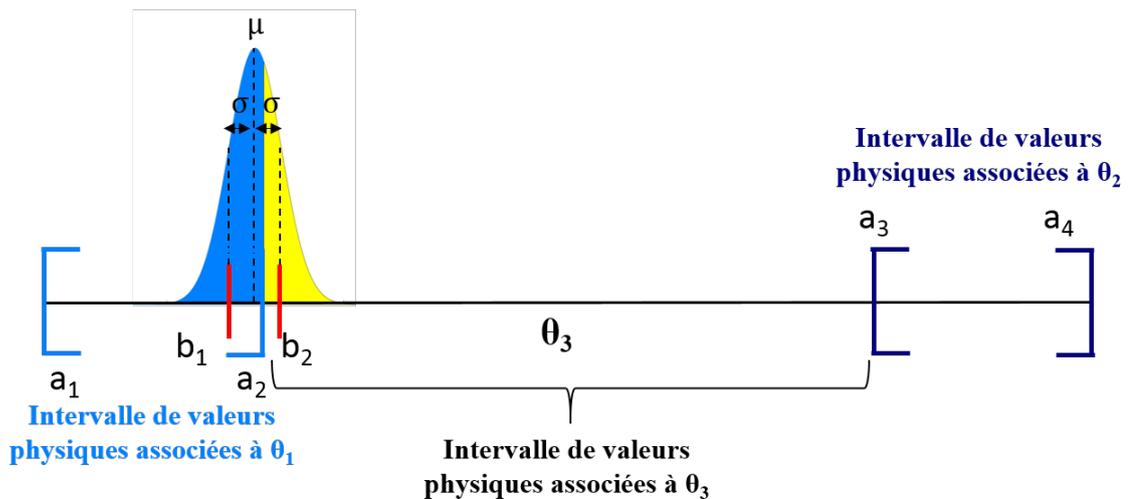


FIGURE II.10 – répartition des masses de croyance sur les hypothèses de  $\Theta$ , proportionnellement à l'aire sous la gaussienne.

### 3.4.5 Méthode 5 : Aire sous la Gaussienne

Une dernière méthode peut également être considérée, donnant une masse beaucoup plus importante à l'hypothèse associée à la classe de valeurs physiques dans laquelle se trouve l'intervalle de résistivités inversées. Il s'agit, comme pour la méthode 4, de répartir les masses de croyance proportionnellement à la surface sous la gaussienne. A ceci près que la totalité de la masse  $m(\cdot) = 1$  est ainsi répartie et que les distances de Wasserstein ne sont pas considérées. Cette méthode est celle donnant le plus de poids à l'information géophysique parmi les 5 proposées.

## 3.5 Section issue de la construction de masses de croyance géophysiques

Dans le cadre de cet exemple, l'attribution des masses de croyance a été réalisée avec la méthode 1. Une représentation de ces résultats d'attribution est représentée Figure II.11. La figure II.11.a présente, pour chacune des mailles de la section issue de l'inversion, les hypothèses de  $\Theta$  ayant la plus grande masse de croyance associée. Les valeurs de masses associées à ces hypothèses sont présentées Figure II.11.b.

Ces résultats soulignent le fait que la méthode de tomographie de résistivité électrique, associée à la méthode d'inversion choisie, bien qu'arrivant à indiquer la présence du matériau conducteur dans la partie inférieure de la section et la présence d'un matériau plus résistif au-dessus, n'arrive pas à caractériser l'interface de manière franche. Les valeurs de résistivités inversées étant entre les deux intervalles de  $\theta_1$  et  $\theta_2$  entre 6 et 9.5 m de profondeur environ (Figure II.7), l'hypothèse  $\theta_3$  est celle ayant la plus grande masse de croyance associée, bien que sa valeur soit relativement faible (Figure II.11.b).

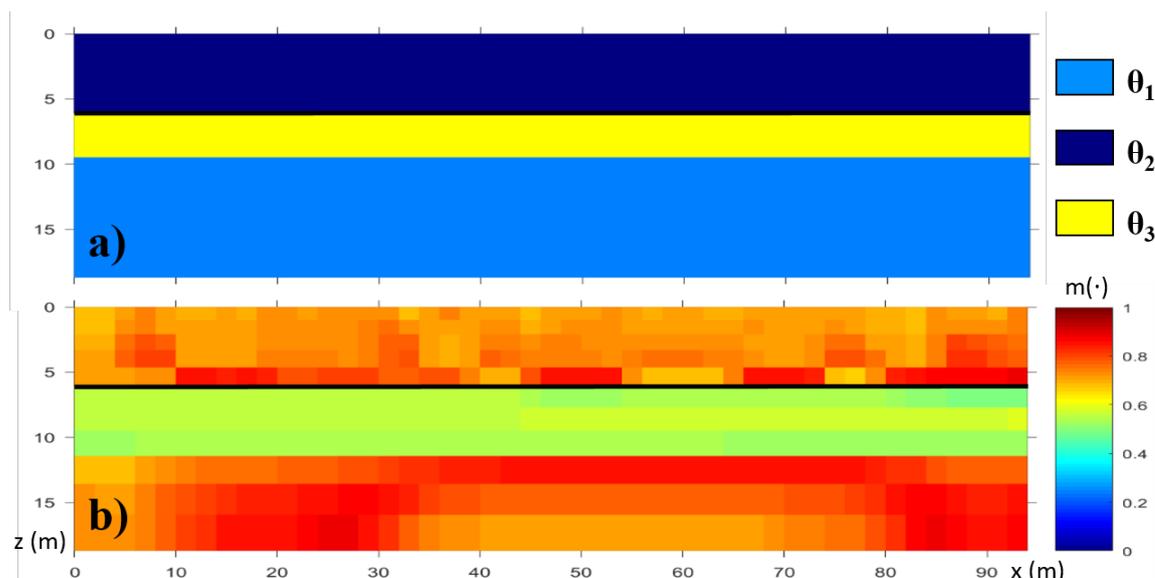


FIGURE II.11 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à la construction des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 1. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers.

## 4 Construction de masses de croyance à partir de données géotechniques

Dans le cadre de cet exemple, nous considérons la méthode du cône de pénétration (CPT) comme méthode de reconnaissance géotechnique. C'est une méthode privilégiée sur les ouvrages hydrauliques qui fait l'objet d'une présentation (Chapitre I, Section A.4.3) mettant en avant ses atouts pour la caractérisation des digues de protection fluviale.

### 4.1 Caractérisation du cadre de discernement

Le modèle de sous-sol étudié étant composé d'un matériau fin ( $\theta_1$ ) et d'un matériau plus grossier ( $\theta_2$ ), il est possible d'associer des valeurs de résistances de pointes,  $q_c$  [MPa], à un type de matériau grâce au diagramme de classification de Robertson (1990) présenté Figure II.12. Dans ce diagramme, les sols sont répartis en fonction de  $q_c$  et du ratio de friction,  $R_f$  (en %) obtenu par :

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100 \quad (\text{II.22})$$

Avec  $f_s$  la valeur de frottement latéral (en MPa).

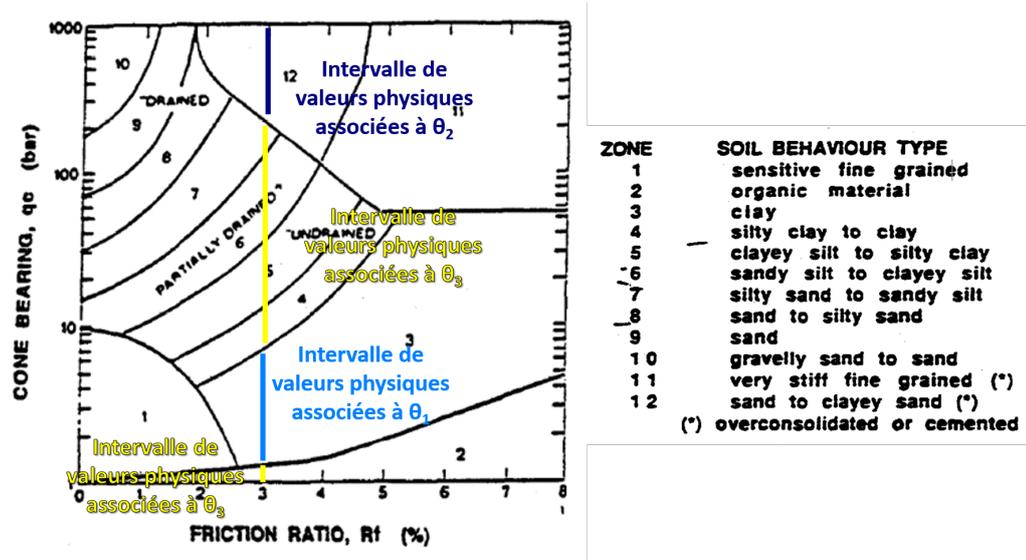


FIGURE II.12 – Diagramme de classification de Robertson (1990), classant les types de sols en fonction des valeurs de résistances de pointe ( $q_c$ ) et du ratio de friction ( $R_f$ ). Mise en évidence des hypothèses de  $\Theta$  associées à ces classes, pour  $R_f = 3\%$ .

Dans notre exemple, nous fixons la valeur de  $R_f$  à 3% afin de n'avoir à utiliser que le paramètre  $q_c$  pour caractériser les classes de valeurs associées à nos hypothèses. Nous faisons ici ce choix, dans un souci de simplification, puisque **nous souhaitons mettre en avant la méthodologie de fusion et non la capacité de la méthode du CPT à caractériser un ensemble géologique**. Ainsi, les classes de valeurs associées aux hypothèses du cadre de discernement pour la méthode du cône de pénétration sont donc définies en MPa comme étant :

$$\begin{aligned}
 & [0.14, 0.7] \text{ associée à l'hypothèse } \theta_1, \\
 & [25, 100] \text{ associée à l'hypothèse } \theta_2, \\
 & [0.1, 0.14] \cup [0.7, 25[ \text{ associée à l'hypothèse } \theta_3.
 \end{aligned}$$

## 4.2 Simulation d'acquisition

Nous simulons 4 essais au CPT, inter-espacés de 20 mètres (à  $x = 20, 40, 60$  et 80 mètres) depuis la surface et jusqu'à 12 mètres de profondeur, capables de distinguer les matériaux grossiers des matériaux fins sous-jacents (Figure II.13). Des acquisitions de résistances de pointe sont réalisées tous les 25 cm verticalement et la largeur de sondage est estimée à 10 cm.

Afin de simuler les valeurs de  $q_c$  en chaque point d'acquisition et pour chacun des 4 sondages, des tirages aléatoires sont réalisés, selon une loi normale, en considérant les valeurs moyennes pour les classes associées à  $\theta_1$  et  $\theta_2$  comme étant respectivement de 0.42 et 62.5 MPa. L'écart-type associé est ici arbitrairement fixé à 10% de la valeur moyenne fixée. Le niveau d'imprécision sur la valeur de  $q_c$  est également de 10%.

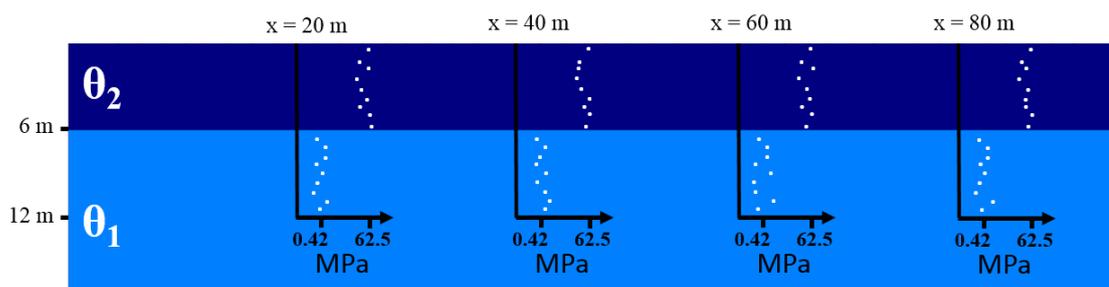


FIGURE II.13 – Représentation des sondages simulés au CPT sur la section de sous-sol considérée et leurs résistances de pointe associées (en  $MPa$ ).

Ces simulations mettent en avant la capacité de la méthode géotechnique à caractériser la présence d'un matériau grossier ( $\theta_2$ ) sur les 6 premiers mètres de la section et d'un matériau plus fin ( $\theta_1$ ) sur les 6 mètres suivants. Cette caractérisation est cependant ponctuelle dans l'espace, contrairement à la caractérisation géophysique.

### 4.3 Attribution de masses de croyance dans les points de sondage et extension de l'information

Une fois les données géotechniques acquises (ou simulées, comme c'est le cas ici), il est nécessaire de pouvoir les associer à des fonctions de masses de croyance réparties sur les hypothèses de  $\Theta$ , d'abord au niveau des points de sondages, puis sur l'ensemble de la section de sous-sol considérée. Pour ce faire, à chaque profondeur d'acquisition, les valeurs du paramètre géotechnique retenu sont considérées avec leurs imprécisions associées (Figure II.14.a). Dans notre exemple, on retrouve donc dans chaque sondage 48 (soit  $12\text{ m} / 0.25\text{ m}$ ) intervalles de valeurs de  $q_c$ . Puisque dans les points de sondages, la méthode d'investigation est au contact direct du matériau caractérisé, c'est à cet endroit que la masse de croyance géotechnique doit être la plus importante. A chaque maille de dimension « largeur de sondage  $\times$  pas d'acquisition » est donc associée un intervalle de  $q_c$ . Au niveau des points de sondages, l'utilisateur affecte alors une valeur de masse de croyance sur l'hypothèse de  $\Theta$ , associée à l'intervalle correspondant à la valeur du paramètre  $q_c$  (Figure II.14.b).

Une discrétisation de la section, fonction de la profondeur d'investigation géotechnique et du pas d'acquisition, est ensuite réalisée (Figure II.14.c), permettant de couvrir tout l'espace inter-forages. Afin de caractériser l'ensemble de la section du modèle, comme le fait la méthode géophysique, et d'associer des fonctions de masses de croyance à chaque cellule nouvellement créée, une décroissance exponentielle de la masse de croyance est imposée latéralement. Cette décroissance est considérée latéralement car nous faisons l'hypothèse d'une répartition plutôt tabulaire des matériaux géologiques. Elle se fait depuis le sondage considéré, jusqu'au sondage le plus proche, vers la gauche et vers la droite. Le taux de décroissance est fonction des valeurs géotechniques proposées par le sondage voisin. Ainsi, pour une profondeur donnée :

$$M(x) = M(0) \cdot e^{-kC_v x} \quad (\text{II.23})$$

Avec  $x$  la distance de la maille de la section au sondage considéré ( $x = 0$  au sondage),  $M(x)$  la distribution de masses de croyance affectée à chaque hypothèse du cadre de discernement pour une position  $x$ , avec  $M(0)$  les valeurs de masses de croyance dans le sondage.  $k$  est un coefficient de décroissance fixé par l'utilisateur et permettant d'impacter le taux de décroissance latérale de la masse de croyance.  $C_v$  correspond au coefficient de variation, à profondeur fixée entre deux sondages, tel qu'utilisé par Phoon and Kulhawy (1999), et s'écrivant :

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_{mesh}-1} \sum_{i=1}^{n_{mesh}} (Q - Q_i)^2}}{Q} \quad (\text{II.24})$$

Où  $Q$  est la valeur du paramètre géotechnique dans la maille de référence du sondage considéré, et  $Q_i$  les valeurs du paramètre géotechnique dans le sondage voisin (Figure II.14.b). Dans le cadre de cet exemple, et de manière plus générale dans le cadre de ce travail de thèse, nous considérons une valeur de  $n_{mesh} = 3$ , pour que le calcul de  $C_v$  prenne en considération 3 mailles dans le sondage voisin, centrées sur la même profondeur que la maille de référence. Cette valeur pourrait cependant être modifiée en fonction des souhaits et considération de l'utilisateur. Ainsi, pour deux sondages consécutifs présentant des valeurs semblables d'un même paramètre géotechnique, à même profondeur, la décroissance de la confiance est plus lente que pour deux sondages consécutifs qui présenteraient des valeurs radicalement différentes.

Concernant les sondages en bout (premier et dernier sondages d'une section), aucun sondage n'est présent à leur gauche et à leur droite respectivement. Les taux de décroissance retenus sont considérés égaux à ceux calculés à leur droite et à leur gauche respectivement, faute de plus d'information disponible.

Pour une cellule donnée du maillage, si la masse de croyance associée à une hypothèse est inférieure à 1, alors le reste de la masse à allouer est répartie, en respectant  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ , sur l'hypothèse « n'importe quel matériau géologique » représentée par l'union des hypothèses de  $\Theta$ . Dans notre exemple, si au sein d'une maille  $\alpha$ , une masse  $m^\alpha$  est attribuée à l'une des hypothèses de  $\Theta$  telle que  $m^\alpha < 1$ , alors :

$$m(\Theta) = m(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3) = 1 - m^\alpha \quad (\text{II.25})$$

Dans les mailles situées sous la profondeur d'investigation géotechnique, comme aucune information n'est disponible, il est considéré que  $m(\Theta) = 1$ .

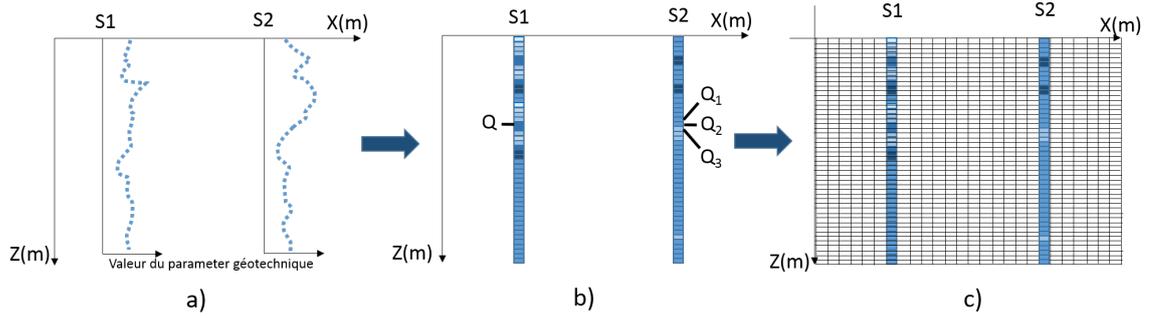


FIGURE II.14 – Construction du maillage pour le traitement de l’information géotechnique à partir d’un exemple de deux sondages ( $S1$  et  $S2$ ). a) Représentation des valeurs géotechniques pour  $S1$  et  $S2$  en fonction de la profondeur. b) Les points de sondages sont divisés en mailles, chacune associée à une distribution de masses de croyance  $M(0)$ . c) Discrétisation de la section en un maillage couvrant la totalité de la section.

Dans cette étape de construction des masses de croyance à partir de données géotechniques, l'utilisateur a la possibilité d'impacter de manière importante la distribution des masses de croyance à l'aide de deux paramètres. Premièrement, la valeur du coefficient  $k$  faisant décroître plus ou moins rapidement la masse de croyance depuis le sondage considéré. Ainsi, dans un milieu fortement variable, une valeur importante de  $k$  pourrait être privilégiée. Deuxièmement, la valeur de  $M(0)$  est une valeur clé puisqu'elle indique la confiance associée à la caractérisation du matériau au niveau du sondage. Une valeur de 1 est à associer à une certitude absolue alors qu'une valeur de 0 est à associer à une incertitude absolue. Cette attribution de valeur sera essentiellement fonction de la capacité de la méthode géotechnique à caractériser correctement le matériau investigué.

#### 4.4 Combinaison d'information entre deux sondages

L'information géotechnique étant étendue depuis un sondage jusqu'au sondage voisin, cela implique une double information au niveau des mailles inter-sondages (information venant de la gauche et information venant de la droite). Afin de n'avoir qu'une seule distribution de masses de croyance géotechnique dans chaque maille, il s'agit de traiter cette double information. Dans le cadre de la réflexion de ce travail de thèse, une démarche reposant sur des sommes a premièrement été envisagée (Section 4.4.1). Une seconde démarche reposant sur un processus de fusion d'informations au sein des données géotechniques, entre sondages, a ensuite été proposée (Section 4.4.2).

##### 4.4.1 Somme

Pour une maille située entre deux sondages géotechniques, la distribution de masses de croyance provenant du sondage à gauche est notée  $m_2^{(l)}(\cdot)$  et celle provenant du sondage à droite est notée  $m_2^{(r)}(\cdot)$ . Il s'agit donc d'obtenir une distribution

commune par l'utilisation de sommes, notée  $m_2(\cdot)$ . Les masses de croyance associées aux éléments de  $2^\Theta \setminus \Theta$  provenant de la gauche et de la droite sont sommées afin d'obtenir  $m_2^{(l+r)}(\cdot)$ . Si la valeur associée est supérieure à 1, alors les masses sont normalisées de sorte à ce que  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$  (Table II.7). Si en revanche, la valeur est inférieure à 1, le complément de masse restante est attribué à l'hypothèse incertaine,  $\Theta$  (Table II.8). Les exemples retenus dans les Tables II.7 et II.8 considèrent un cadre de discernement  $\Theta$  simple, composé de deux hypothèses  $\theta_1$  et  $\theta_2$ .

TABLE II.7 – Exemple d'une distribution de masses de croyance géotechniques, cas de  $m_2^{(l+r)}(\cdot) > 1$

	$m_2^{(l)}(\cdot)$	$m_2^{(r)}(\cdot)$	$m_2^{(l+r)}(\cdot)$	$m_2(\cdot)$
$\theta_1$	0.8	0.5	1.3	1
$\theta_2$	0	0	0	0
$\theta_1 \cup \theta_2$	0.2	0.5	0	0

TABLE II.8 – Exemple d'une distribution de masses de croyance géotechniques, cas de  $m_2^{(l+r)}(\cdot) < 1$

	$m_2^{(l)}(\cdot)$	$m_2^{(r)}(\cdot)$	$m_2^{(l+r)}(\cdot)$	$m_2(\cdot)$
$\theta_1$	0.4	0.3	0.7	0.7
$\theta_2$	0	0	0	0
$\theta_1 \cup \theta_2$	0.6	0.7	0	0.3

Cette méthode présente la particularité de surestimer la qualité de l'information géotechnique en ne considérant pas la masse attribuée sur  $\Theta$  dans les valeurs à sommer.

#### 4.4.2 Fusion de l'information géotechnique de type CPT

Afin de considérer le niveau d'incertitude tel qu'il est décrit par le sondage à gauche et le sondage à droite, un processus de fusion peut être réalisé. Cette fusion est alors menée entre  $m_2^{(l)}(\cdot)$  et  $m_2^{(r)}(\cdot)$ , avec l'information venant du sondage de gauche faisant office de première source d'information, et l'information venant du sondage de droite faisant office de deuxième source d'information.

La fusion s'opère alors en suivant la règle de combinaison de Dempster-Shafer, faisant l'hypothèse d'un monde fermé. L'hypothèse d'un monde ouvert de Smets n'est pas faite car nous ne pourrions pas tenir compte de la masse allouée au conflit pour le processus de fusion d'informations géophysiques et géotechniques qui suit. La règle de combinaison de PCR6 n'a pas non plus été retenue ici. En effet, lorsque pour une même profondeur, deux sondages consécutifs présentent des valeurs très différentes, la décroissance de la confiance associée à l'hypothèse considérée est très rapide. Ainsi, cette étape de fusion de l'information géotechnique n'est pas amenée à combiner des informations très conflictuelles. Or, c'est essentiellement dans un

cas de figure très conflictuel que la règle de PCR6 s'avère meilleure que la règle de Dempster-Shafer (cf. Section A.5). Par ailleurs, étant plus complexe et longue à implémenter que la règle historique de Dempster-Shafer, nous ne l'avons pas retenue ici.

#### 4.5 Section issue de la construction de masses de croyance géotechniques

Dans le cadre de cet exemple, l'attribution des masses a été réalisée en considérant un processus de fusion entre les sondages, avec une masse de croyance de  $M(0) = 0.99$  dans les sondages et en utilisant un coefficient de décroissance latérale de  $k = 1$ . La représentation de la construction des masses de croyance géotechniques est visible Figure II.15.

Ces résultats mettent en avant le fait que la méthode géotechnique permet de caractériser précisément, et de manière fiable, la position de l'interface entre le matériau fin et le matériau plus grossier. Les matériaux sont mieux caractérisés à proximité des sondages, avec une confiance associée plus importante (Figure II.15.b). Lorsque l'on s'écarte trop des points de sondages, le degré de croyance associé à l'incertitude totale ( $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$ ) augmente, allouant alors à l'union des hypothèses la plus grande masse de croyance (Figure II.15.a). Au-delà de 12 mètres de profondeur, par manque d'information géotechnique, une masse de  $m(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3) = 1$  est fixée. A de telles profondeurs, à l'issue de la fusion, c'est donc l'information géophysique seule qui permet de renseigner sur la nature des matériaux présents.

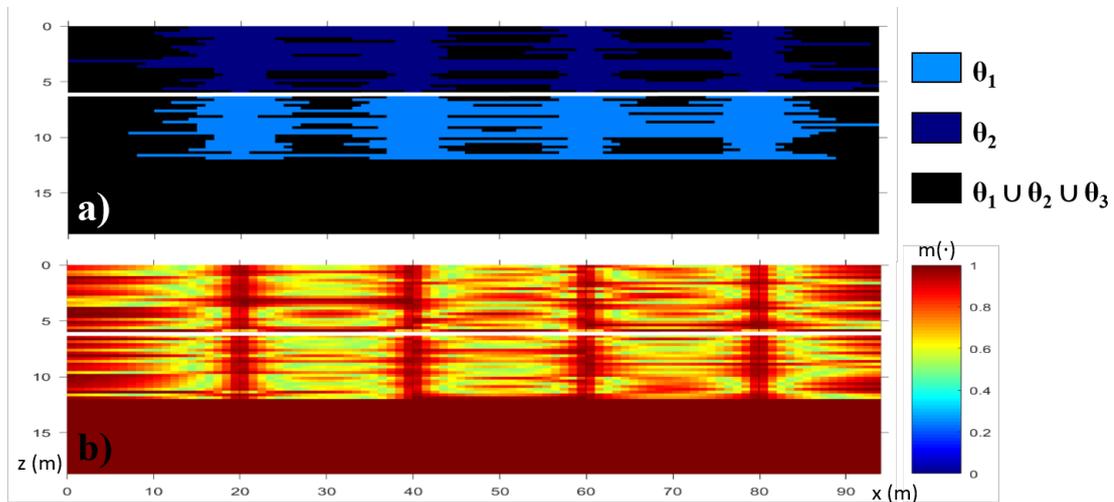


FIGURE II.15 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à la construction des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers.

## 5 Dimensionnement du maillage commun avant la fusion

Un schéma représentatif du dimensionnement du maillage commun à partir des deux grilles de discrétisation géophysiques et géotechniques est représenté (Figure II.16).

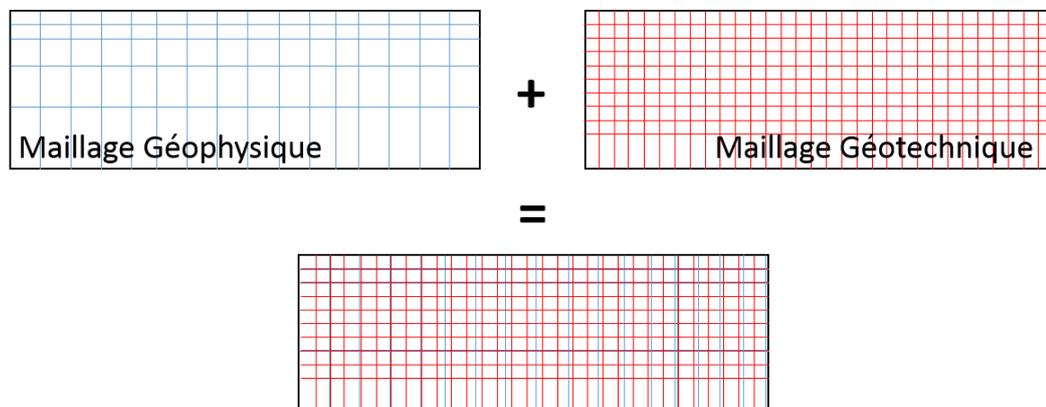


FIGURE II.16 – Exemple d’une superposition de discrétisation géophysique (bleu) et géotechnique (rouge) proposant un nouveau maillage irrégulier sur lequel sont ensuite réalisés les calculs de combinaisons de masses lors de la fusion.

Chaque source d’information impose sa propre discrétisation de la section de sous-sol. Cependant, afin de combiner les masses de croyance provenant de l’information géophysique avec celles provenant de l’information géotechnique, un maillage commun est nécessaire. Ce nouveau maillage doit contenir, dans chaque maille, les masses de croyance géophysiques et géotechniques qu’il s’agira de fusionner par la suite. Afin de ne pas altérer la qualité de l’information, aucune interpolation ni extrapolation n’est effectuée. La grille de discrétisation géophysique est superposée à la grille géotechnique. Un maillage irrégulier est ainsi obtenu, sans que cette étape n’engendre une quelconque approximation géométrique (Figure II.16).

## 6 Fusion des informations géophysiques et géotechniques

Une fois que les deux maillages de mêmes dimensions sont obtenus et que les masses de croyance sont associées à chaque maille, les trois règles de combinaison retenues peuvent être appliquées. Les résultats issus de ces règles sont présentés ci-dessous.

### 6.1 Règle de Smets

Les résultats issus de la combinaison des masses de croyance géophysiques et géotechniques, en faisant l’hypothèse d’un monde ouvert de Smets, sont visibles Figure II.17.

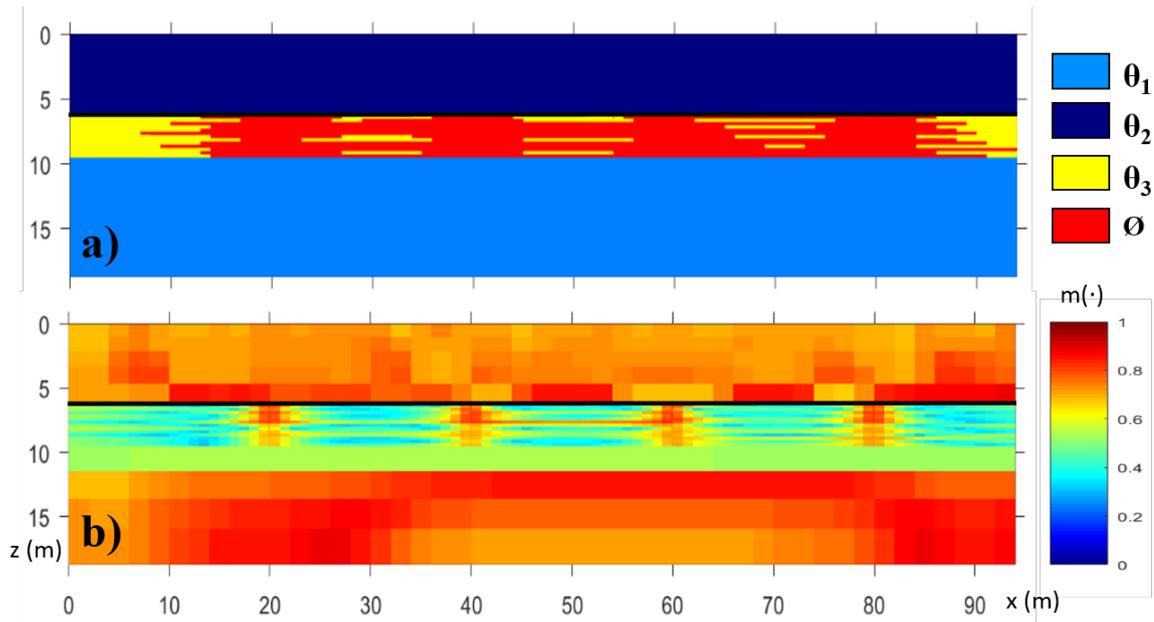


FIGURE II.17 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, avec hypothèse d'un monde ouvert de Smets. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers.

Cette combinaison permet de mettre en évidence le conflit existant entre les sources d'informations, notamment entre 6 et 9.5 mètres de profondeur. C'est en effet à cette profondeur que la tomographie de résistivité électrique laisse envisager la présence d'un matériau autre ( $\theta_3$ ) ne rentrant pas dans les gammes de résistivités des hypothèses  $\theta_1$  et  $\theta_2$  (Figure II.11.a), alors que les sondages CPT y caractérisent mieux les matériaux géologiques (Figure II.15.a).

## 6.2 Règle de Dempster-Shafer

L'hypothèse d'un monde fermé faite par la règle de combinaison de Dempster-Shafer permet de répartir la masse allouée au conflit ( $\emptyset$ ) proportionnellement aux masses associées à chacune des hypothèses. Ainsi, les masses des hypothèses  $\theta_1$  et  $\theta_3$  deviennent majoritaires entre 6 et 9.5 m de profondeur, là où le conflit l'était précédemment avec l'hypothèse d'un monde ouvert (Figure II.17.a).

La Figure II.18.b met en évidence les zones où les masses de croyance sont les plus importantes, elles sont situées à proximité des points de sondages. Par ailleurs, ces zones identifient correctement les matériaux géologiques présents. L'hypothèse d'un matériau autre,  $\theta_3$ , que l'on sait être fausse dans le cas du modèle étudié (Figure II.5), apparaît tout de même, mais avec un niveau de confiance faible ( $m(\theta_3) \approx 0.4$ ) indiquant que ces résultats sont à considérer avec précaution.

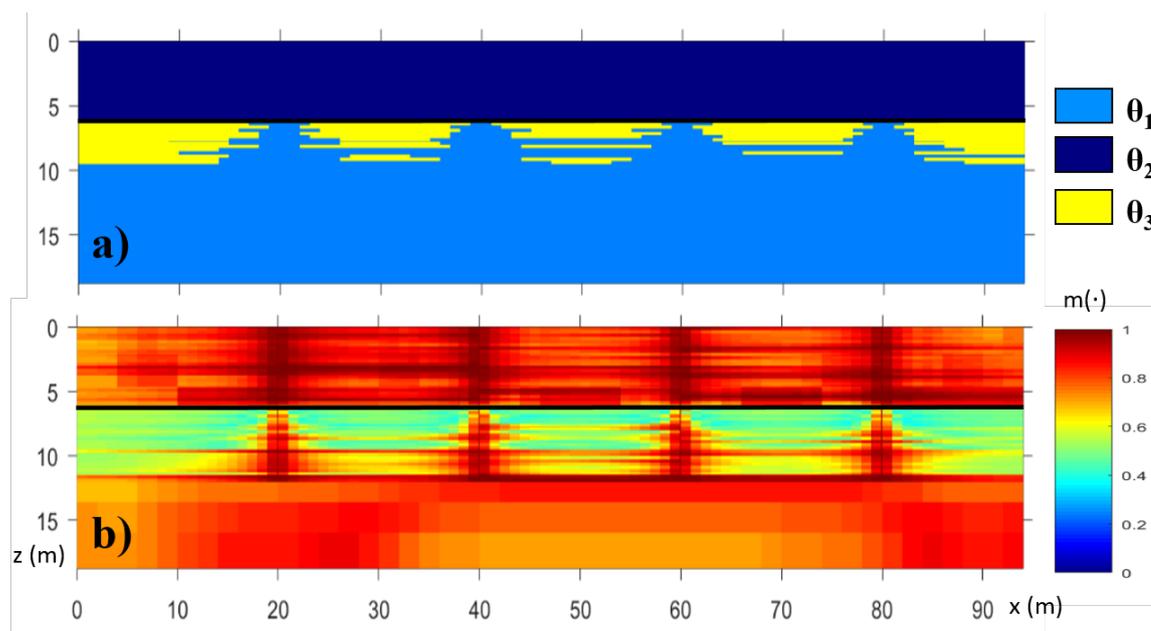


FIGURE II.18 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, avec hypothèse d'un monde fermé et utilisation de la règle de combinaison de Dempster-Shafer. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers.

### 6.3 Règle de PCR6

Les résultats issus de l'utilisation de la règle de PCR6 (Figure II.19) sont semblables à ceux obtenus avec la règle de Dempster-Shafer (Figure II.18) avec cependant une plus grande proportion d'hypothèse  $\theta_1$  majoritaire entre 6 et 9.5 mètres, plus proche donc de la réalité du modèle vrai (Figure II.5). En revanche, les masses de croyance associées aux hypothèses majoritaires sont plus faibles que celles déterminées avec la règle de combinaison de Dempster-Shafer.

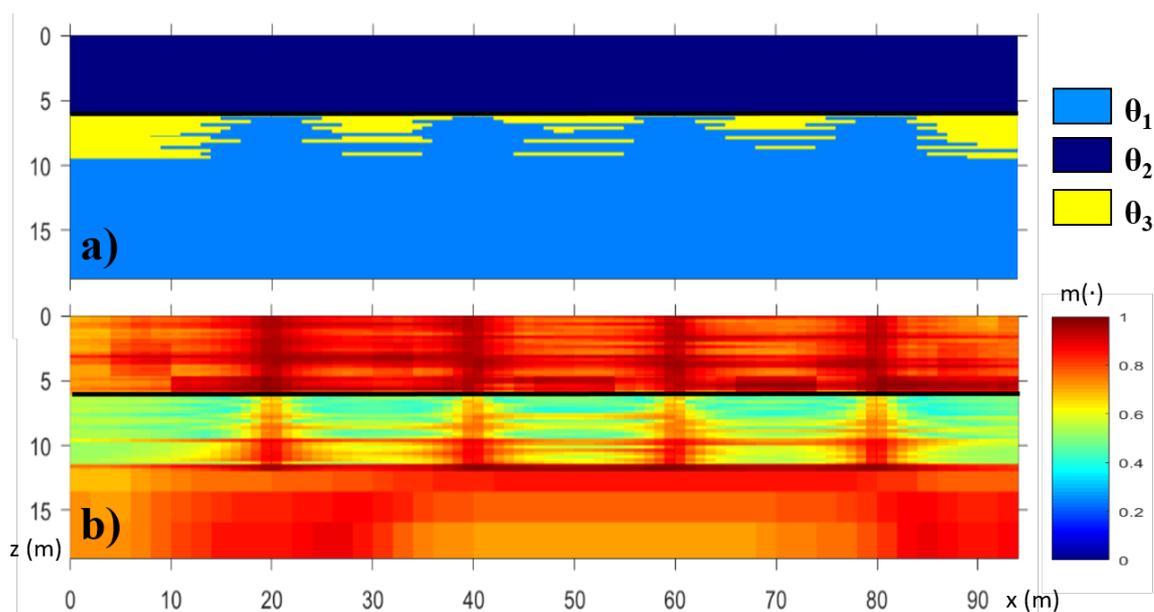


FIGURE II.19 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, avec hypothèse d'un monde fermé et utilisation de la règle de combinaison de PCR6. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne noire représente l'emplacement réel de l'interface entre les matériaux fins et grossiers.

## 7 Conclusion

La méthodologie de fusion d'informations géophysiques et géotechniques développée a pu être présentée en détail dans cette partie, en se basant sur un exemple numérique simple. Il s'agit d'un modèle bicouche composé d'un matériau géologique fin surmonté d'un matériau plus grossier, pouvant être assimilé à une coupe longitudinale d'OHT.

Une fois le modèle construit et le cadre de discernement  $\Theta$  fixé, des acquisitions de TRE (partie géophysique) et de CPT (partie géotechnique) sont simulées afin d'obtenir des résultats tels qu'ils pourraient être obtenus lors d'une véritable campagne de reconnaissance. Ces données sont ensuite associées à des fonctions de masses de croyance, pour chaque maille de la section de sous-sol. L'attribution de ces masses de croyance peut-être effectuée selon plusieurs méthodes qui ont été proposées et détaillées dans cette partie.

Les règles de combinaison doivent enfin être appliquées sur un maillage commun, afin de proposer les hypothèses ayant la plus grande masse de croyance à l'issue de la fusion ainsi que leur degré de croyance associé. Les résultats obtenus, dans le cadre de l'exemple considéré, mettent en avant la capacité de cette approche, reposant sur la théorie des masses de croyance, à caractériser correctement deux ensembles géologiques et à localiser l'interface de manière précise. En plus de cela, ces résultats sont présentés avec un degré de confiance associé, ce qui pourrait permettre au

gestionnaire de l'ouvrage de savoir où les investigations doivent être renforcées et où les sources d'informations sont en conflit (lorsque l'hypothèse d'un monde ouvert est faite). Les résultats obtenus avec la règle de Smets permettent de mettre en avant un conflit important entre les sources d'information sous le niveau de l'interface entre les matériaux. Les normalisations effectuées avec les règles de DS et PCR6 permettent de localiser correctement la position de l'interface et de discriminer les deux ensembles géologiques. Il apparaît, pour cet exemple, que la règle PCR6 caractérise mieux la section que la règle de DS, mais avec des niveaux de confiance associés qui sont plus faibles.

La méthodologie présentée et discutée dans cette **Partie B** est basée sur le choix de deux méthodes de reconnaissance particulières que sont la TRE et le CPT. Si d'autres types de méthodes géophysiques et géotechniques venaient à être considérées, l'attribution des masses de croyance devrait être adaptée pour chaque méthode. En revanche, l'augmentation du nombre de sources d'information n'amènerait pas un changement des principes de fusion.

Dans cette partie, nous n'avons présenté des résultats de fusion que pour une méthode d'attribution des masses de croyance géophysiques ainsi que pour des valeurs spécifiques de  $M(0)$  et  $k$ . L'objectif de cette partie étant de se concentrer uniquement sur le fonctionnement de la méthodologie et non sur les résultats. Dans le chapitre suivant, une étude synthétique compare les résultats obtenus en considérant l'ensemble des différentes méthodes de construction de masses de croyance géophysiques et géotechniques présentées dans ce Chapitre II, Partie B. L'objectif étant alors de bien saisir l'intérêt et les limites de chaque méthode de construction et l'impact du choix de la valeur de certains paramètres.

---

## Chapitre III

### Etude de la sensibilité de la méthodologie de fusion

Après avoir présenté la méthodologie de combinaison d'informations géotechniques et géophysiques au sein du Chapitre II, il s'agit dans ce troisième chapitre de thèse, de comparer les résultats obtenus en considérant les différentes méthodes d'attribution de masses de croyance géophysiques et différentes valeurs de paramètres d'entrée pour l'attribution des masses de croyance géotechniques. Pour ce faire, une **étude synthétique** est proposée. Ce chapitre s'attarde sur le modèle de sous-sol considéré ainsi que sur les résultats d'attribution de masses de croyance géophysiques. Les résultats associés à l'attribution des masses de croyance géotechniques ainsi que les résultats de fusion obtenus pour un modèle de sous-sol plus complexe que celui considéré au chapitre précédent sont ensuite présentés. Les analyses de résultats ainsi que les discussions associées permettent de comprendre l'intérêt et les limites de chaque méthode d'attribution ainsi que de nous orienter vers celles qui semblent les plus appropriées.

## Chapitre 3

---

1	Introduction . . . . .	116
2	Modèle considéré et cadre de discernement . . . . .	117
3	Construction d'un modèle géoélectrique . . . . .	118
4	Simulation d'acquisition et inversion des sections de résistivités apparentes . . . . .	119
5	Résultats de l'attribution de masses de croyance à partir des différentes méthodes proposées . . . . .	121
5.1	Méthode 1 : distances de Wasserstein . . . . .	121
5.2	Méthode 2 : distances de Hausdorff . . . . .	123
5.3	Méthode 3 : distances de Wasserstein et classes concernées . . . . .	124
5.4	Méthode 4 : distances de Wasserstein et aire sous la Gaussienne . . . . .	126
5.5	Méthode 5 : Aire sous la Gaussienne . . . . .	127
5.6	Discussion . . . . .	129
6	Construction d'un modèle géotechnique et caractérisation du cadre de discernement . . . . .	129
7	Résultats de l'attribution des masses de croyance en fonction de la masse de croyance dans le sondage . . . . .	130
7.1	$M(0)=0.25$ . . . . .	130
7.2	$M(0)=0.5$ . . . . .	131
7.3	$M(0)=0.75$ . . . . .	132
7.4	$M(0)=0.99$ . . . . .	133
7.5	Discussion . . . . .	134
8	Résultats de l'attribution des masses de croyance en fonction de $k$ . . . . .	135
8.1	$k=0.25$ . . . . .	135
8.2	$k=0.5$ . . . . .	136
8.3	$k=1$ . . . . .	136
8.4	$k=2$ . . . . .	136
8.5	Discussion . . . . .	137
9	Résultats de l'attribution des masses de croyance à partir d'un processus de somme entre deux sondages . . . . .	138
10	Résultats à l'issue de la fusion . . . . .	139
11	Conclusion . . . . .	143

---

## 1 Introduction

Après avoir introduit la méthodologie de combinaison d'informations géophysiques et géotechniques (Chapitre II, Partie B), nous proposons dans ce chapitre une première étude synthétique traitant des différentes méthodes d'attribution de masses de croyance géophysiques (Chapitre II, Section B.3.4.). Il s'agira de comparer les résultats obtenus à l'issue du processus d'attribution de masses de croyance pour chacune des 5 méthodes proposées.

Pour ce faire, un nouveau modèle numérique 2D de sous-sol est considéré, sur lequel pourra être simulée une campagne d'acquisition géophysique, en considérant la méthode de tomographie de résistivité électrique, comme au chapitre précédent. Différents niveaux de bruits sur les données de résistivités apparentes acquises sont fixés, afin d'évaluer la qualité de la réponse apportée par notre méthodologie d'attribution des masses de croyance en fonction de la qualité des données.

Nous nous intéressons ensuite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant (comme au Chapitre II) la méthode du CPT avec une valeur de ratio de friction fixée à 3%. Seul le paramètre de résistance de pointe (MPa) est donc pris en considération pour la construction du modèle géotechnique et la caractérisation du cadre de discernement.

Il s'agit alors de comparer et discuter les résultats obtenus, en fonction des différentes valeurs de paramètres pouvant être fixées par l'utilisateur. Dans la méthodologie que nous proposons, certaines valeurs peuvent en effet être choisies à dire d'experts. Il est donc important de bien saisir le rôle de ces paramètres sur l'attribution des masses de croyance géotechniques. Les deux paramètres concernés sont i) la distribution de masses de croyance  $M(0)$  fixée dans les sondages et ii) le coefficient de décroissance latérale de la confiance en l'information,  $k$ .

Nous insistons sur le fait que le nouveau modèle de sous-sol choisi pour ce chapitre **n'a pas valeur de démonstration absolue**. Néanmoins, il permettra d'illustrer et de comprendre clairement certaines propriétés fondamentales de la méthodologie de fusion développée. L'objectif d'une telle étude synthétique est de permettre de mettre en avant les intérêts et défauts respectifs de chaque méthode d'attribution de masses de croyance afin d'être capable d'en retenir une dans la suite de ce manuscrit de thèse.

Finalement, des résultats de fusion seront présentés afin de montrer la capacité de la méthodologie développée à caractériser un sous-sol composé de trois matériaux géologiques, avec variations d'épaisseur locale, et avec une des deux sources d'information dans l'incapacité de distinguer deux des trois matériaux.

## 2 Modèle considéré et cadre de discernement

Le modèle de sous-sol considéré dans ce chapitre diffère du modèle bicouche simple précédemment utilisé. Nous faisons ici le choix de présenter un modèle tricouche avec variations d'épaisseur des matériaux géologiques à l'extrémité de la section considérée (Figure III.1). Un tel choix de modèle est fait afin de présenter la capacité de notre méthodologie à caractériser un milieu légèrement plus complexe et à prendre en considération un cadre de discernement recensant plus d'hypothèses.

Il est intéressant, dans ces premières étapes de développement, de travailler avec un modèle restant relativement simple, afin d'être en mesure d'évaluer le rôle et l'impact qu'a chaque méthode d'attribution des masses de croyance, sur les résultats obtenus. Un modèle complexe ne permettrait pas nécessairement de mettre en avant les avantages de chaque méthode ou de chaque valeur de paramètre entrant. De plus, il est intéressant d'utiliser un modèle proche de celui utilisé au précédent chapitre afin d'avoir une référence à laquelle se rattacher. Cependant, nous considérons ici une couche géologique supplémentaire et le milieu est perturbé à l'extrémité droite de la section. La perturbation est volontairement choisie à l'extrémité de la section afin de mettre en difficulté la méthode de TRE et de souligner l'intérêt de la méthodologie de fusion à combiner l'information géotechnique avec l'information géophysique. Comme dit précédemment, nous avons conscience qu'un exemple de sous-sol ne peut avoir vocation à être représentatif de la multitude de milieux pouvant être rencontrés et simulés, mais il devrait aider à la compréhension des propriétés fondamentales de la méthodologie.

Il s'agit d'une section 2D s'étendant sur 94 mètres de long et composée de trois matériaux géologiques dont la granulométrie augmente depuis la base du modèle (18.7 m de profondeur) jusqu'à la surface. Le matériau le plus grossier est présent en surface sur 4 m d'épaisseur et sur 6 m d'épaisseur entre  $x = 82$  et  $x = 94$  m. Le matériau le plus fin s'étend quant à lui entre 8 et 18.7 m et entre 10 et 18.7 m de profondeur entre  $x = 76$  et  $x = 94$  m. Le matériau intermédiaire est quant à lui, localisé entre les deux autres ensembles.



FIGURE III.1 – Représentation de la section tricouche de sous-sol considérée, composée d'un matériau fin ( $\theta_1$ ) surmonté d'un matériau intermédiaire ( $\theta_2$ ) et d'un matériau plus grossier ( $\theta_3$ ).

Le cadre de discernement  $\Theta$  est ainsi composé de quatre hypothèses, tel que  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$ . Avec :

- $\theta_1$  correspondant au matériau géologique fin,
- $\theta_2$  correspondant au matériau géologique intermédiaire,
- $\theta_3$  correspondant au matériau géologique grossier,
- $\theta_4$  correspondant à un matériau géologique « autre ».

### 3 Construction d'un modèle géoélectrique

En reprenant la table de Palacky (1988) (Figure II.6), nous associons les gammes de résistivités électriques suivantes ( $\Omega.m$ ) aux différentes hypothèses :

- [5, 50] associée à l'hypothèse  $\theta_1$ ,
- [100, 500] associée à l'hypothèse  $\theta_2$ ,
- ]500,  $10^3$ [ associée à l'hypothèse  $\theta_2 \cup \theta_3$ ,
- [ $10^3$ ,  $5.10^3$ ] associée à l'hypothèse  $\theta_3$ ,
- [0.5, 5[ $\cup$ ]50, 100[ $\cup$ ]5.10<sup>3</sup>, 5.10<sup>4</sup>] associée à l'hypothèse  $\theta_4$ .

Nous faisons le choix de ne pas fixer les bornes de ces intervalles de résistivités basées sur une représentation en classe modale (Chapitre II, Section B.3.3.). En effet, dans le cadre de cette étude synthétique, nous comparons les résultats obtenus avec différents niveaux de bruit sur les données. Associer différents intervalles de résistivités à chaque hypothèse du FoD, en fonction du niveau de bruit, rendrait la comparaison des résultats d'attribution des masses de croyance, pour une même méthode avec différents niveaux de bruit, trop complexe.

Nous faisons l'hypothèse que l'intervalle  $[500, 10^3] \Omega.m$  est associé à l'hypothèse  $\theta_2 \cup \theta_3$ , indiquant l'impossibilité de savoir si les valeurs de cet intervalle se rattachent à l'hypothèse  $\theta_2$  OU  $\theta_3$ . Ceci explique pourquoi l'intervalle  $[500, 10^3] \Omega.m$  n'est pas associé à l'hypothèse  $\theta_4$  dans la construction du FoD, comme le lecteur aurait pu s'y attendre pour des hypothèses associées à des gammes de résistivités distinctes.

Ce choix est fait afin de différer de la situation introduite dans le Chapitre II. Nous ne souhaitons en effet pas proposer un modèle géoélectrique composé de trois couches ayant trois valeurs de résistivités électriques distinctes. Si nous avons procédé ainsi, les masses de croyance auraient à nouveau été Bayésiennes. Nous souhaitons considérer des valeurs de résistivités électriques identiques pour les ensembles géologiques intermédiaires ( $\theta_2$ ) et grossiers ( $\theta_3$ ) afin d'avoir un modèle géoélectrique composé d'uniquement deux couches (Figure III.2). Une première couche (707  $\Omega.m$ ) associée à l'hypothèse  $\theta_2 \cup \theta_3$  est ainsi fixée, afin que la méthode soit dans l'incapacité de distinguer les ensembles  $\theta_2$  et  $\theta_3$ . Une seconde couche sous-jacente de 16  $\Omega.m$  est fixée, rattachée à l'hypothèse  $\theta_1$ . Le modèle de sous-sol est réalisé à l'aide du logiciel libre Res2Dmod (Loke, 2002).

Un des intérêts de considérer une attribution de masses de croyance non Bayésiennes est de pouvoir mettre en avant la capacité de notre méthodologie à proposer des résultats en accord avec la réalité du terrain, malgré l'incapacité d'une source d'information (méthode géophysique ici) à distinguer des ensembles (incertitude de l'information représentée par l'union).

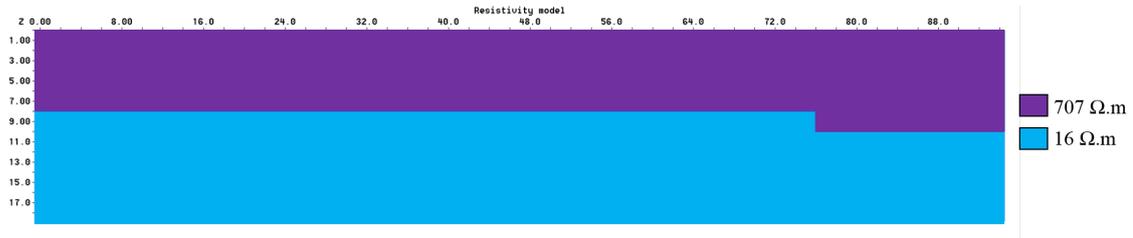


FIGURE III.2 – Modèle géoélectrique considéré, avec non distinction des matériaux géologiques correspondant aux hypothèses  $\theta_2$  et  $\theta_3$ .

#### 4 Simulation d'acquisition et inversion des sections de résistivités apparentes

Comme réalisé dans le précédent chapitre, l'acquisition géoélectrique est simulée à partir de 48 électrodes placées en surface, espacées de 2 mètres, selon une configuration Wenner. L'acquisition est réalisée en considérant trois niveaux de bruits distincts : 0, 5 et 15%. Les résistivités apparentes sont ensuite inversées en considérant une norme L1 sur le modèle (inversion dite « robuste ») à l'aide du logiciel Res2Dinv (Loke and Barker, 1996). Les résultats d'acquisition (Figure III.3) et d'inversion (Figure III.4) sont présentés ci-dessous.

Pour des données acquises sans aucun bruit considéré, les valeurs de résistivités apparentes apparaissent lisses (Figure III.3.a) et une augmentation des résistivités apparentes est représentée sur la partie droite de la section d'étude. Il apparaît que les résistivités apparentes diminuent avec la profondeur. Suite au processus d'inversion (Figure III.4.a), aucune interface franche ne ressort. En revanche, un premier ensemble (jusqu'à environ 7 m de profondeur) présentant des résistivités appartenant à l'intervalle associé à l'hypothèse  $\theta_2 \cup \theta_3$  peut être distingué. Un deuxième matériau sous-jacent (à partir de 11 - 13 m de profondeur), plus conducteur, est également représenté. La variation d'épaisseur des matériaux sur la partie droite se devine légèrement.

Dans le cadre d'un niveau de bruit égal à 5%, les valeurs de résistivités apparentes estimées (Figure III.3.b) sont plus bruitées. Les résistivités inversées (Figure III.4.b), mettent en avant une transition plus graduelle entre les deux couches que ce que l'on pouvait distinguer en l'absence de bruit (Figure III.4.a). Le premier ensemble en surface présente des valeurs de résistivités plus hétérogènes que pour les résultats présentés Figure III.4.a. La variation d'épaisseur des matériaux en bout de section se devine légèrement mais une anomalie relativement plus résistive semble également présente entre 13.6 et 18 m de profondeur, entre  $x = 6$  et  $x = 28$  m.

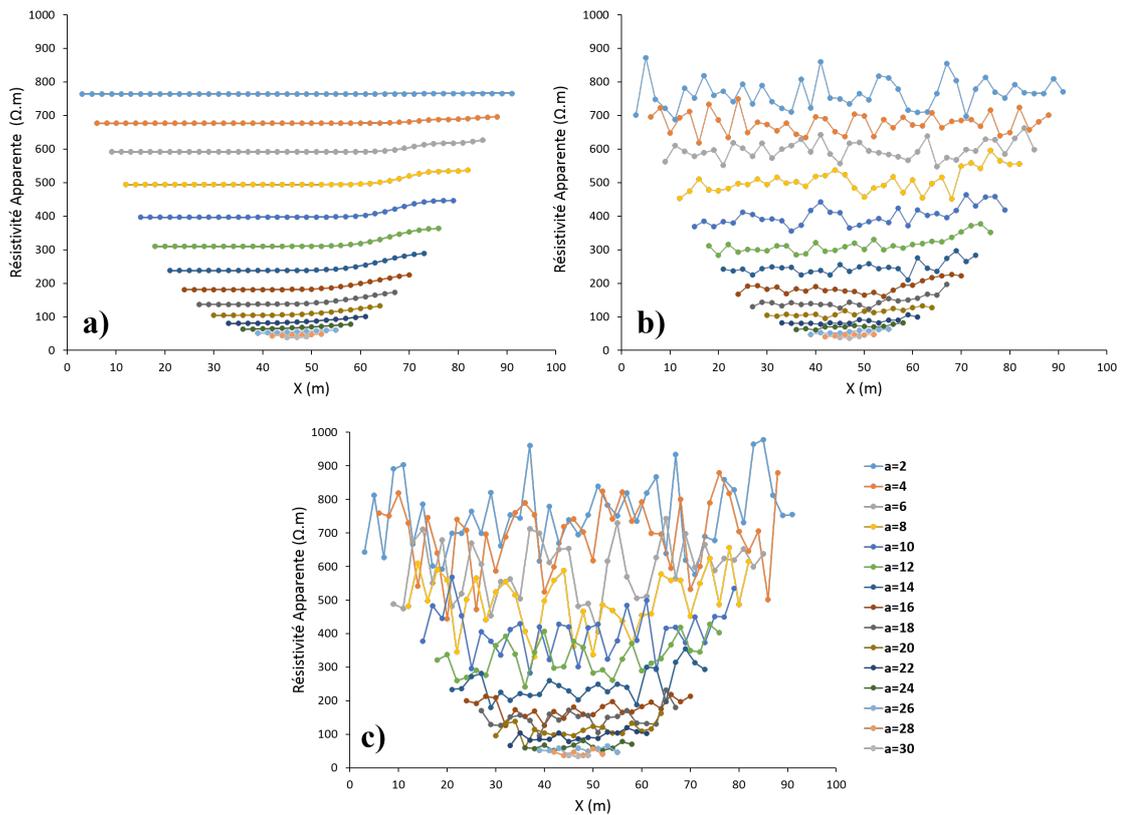


FIGURE III.3 – Profils de résistivités apparentes en fonction de la position en x et de l'écartement inter-électrode ( $a$ ) considéré, a) sans bruit, b) pour un niveau de bruit de 5% et c) pour un niveau de bruit de 15 %, configuration Wenner.

Lorsqu'un niveau de bruit de l'ordre de 15% est imposé, les valeurs de résistivités apparentes calculées sont encore moins homogènes (Figure III.3.c). Concernant les résultats issus de l'inversion, la proportion d'hétérogénéités dans l'ensemble géologique superficiel est encore plus importante (Figure III.4.c) que pour des niveaux de bruit moindres (Figures III.4.a et III.4.b). Les valeurs de résistivités inversées laissent apparaître la présence potentielle d'un matériau relativement plus conducteur en centre de section (entre 4 et 6 m de profondeur) et la variation d'épaisseur en bout de section est toujours représentée. Il est à noter que les valeurs en base de section sont plus élevées que pour les résultats d'inversion à 0 et 5% de bruit (Figures III.4.a et III.4.b).

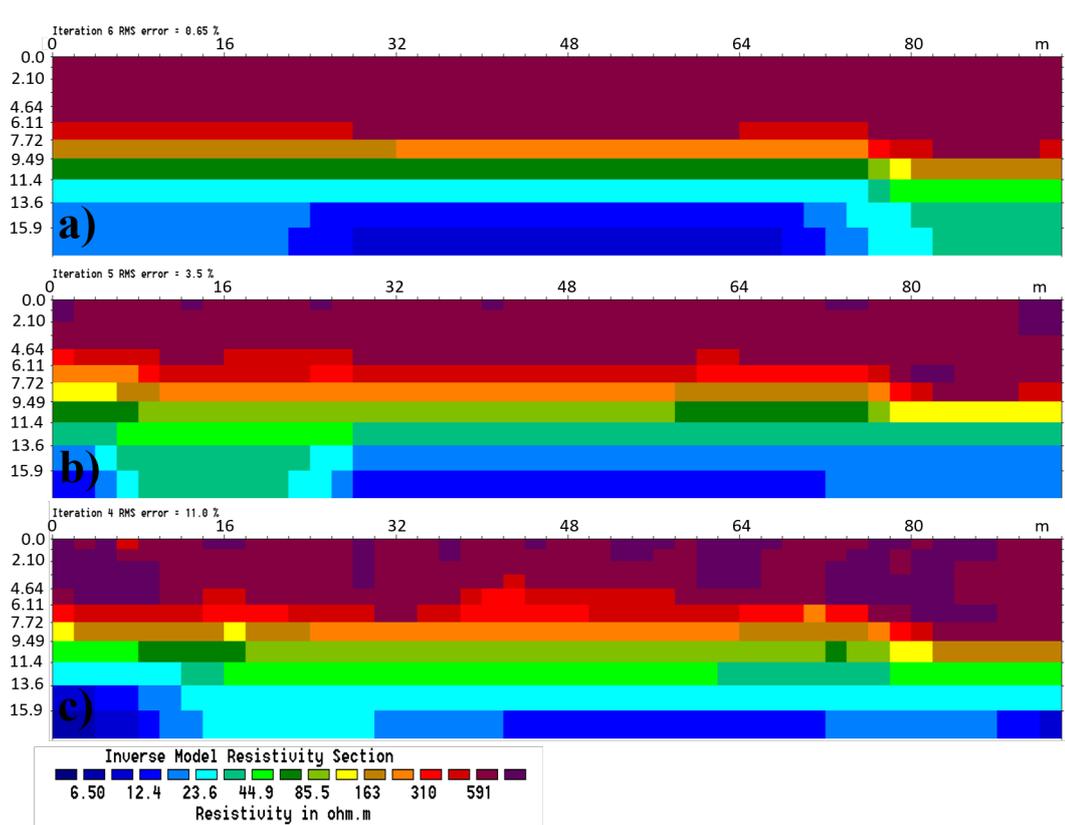


FIGURE III.4 – Section de résistivités inversées (norme L1) pour une acquisition a) sans bruit, b) avec un niveau de bruit de 5%, c) avec un niveau de bruit de 15%.

## 5 Résultats de l'attribution de masses de croyance à partir des différentes méthodes proposées

Les méthodes d'attribution de masses de croyance géophysiques sont présentées au Chapitre II, Section B.3.4. et la numérotation de ces méthodes est conservée et reprise dans cette section.

### 5.1 Méthode 1 : distances de Wasserstein

La méthode 1 repose exclusivement sur l'attribution des masses de croyance en fonction des distances de Wasserstein calculées. Les résultats des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance avec leurs valeurs associées sont représentés Figure III.5. Les résultats sont présentés pour les trois niveaux de bruits considérés (0, 5 et 15%, respectivement Figures III.5.i, III.5.ii et III.5.iii).

Par rapport au modèle géoélectrique construit (Figure III.2), cette méthode permet la caractérisation correcte du premier ensemble correspondant à l'hypothèse  $\theta_2 \cup \theta_3$  mais octroie beaucoup de poids au matériau géologique « autre »,  $\theta_4$ . Ce phénomène s'explique par le fait que la distance d'un intervalle de résistivité inversée est calculée par rapport aux trois intervalles associés à l'hypothèse  $\theta_4$ ; plusieurs valeurs inversées sont susceptibles d'être proches de ces intervalles. Il s'agit d'une des limites de l'utilisation des distances de Wasserstein.

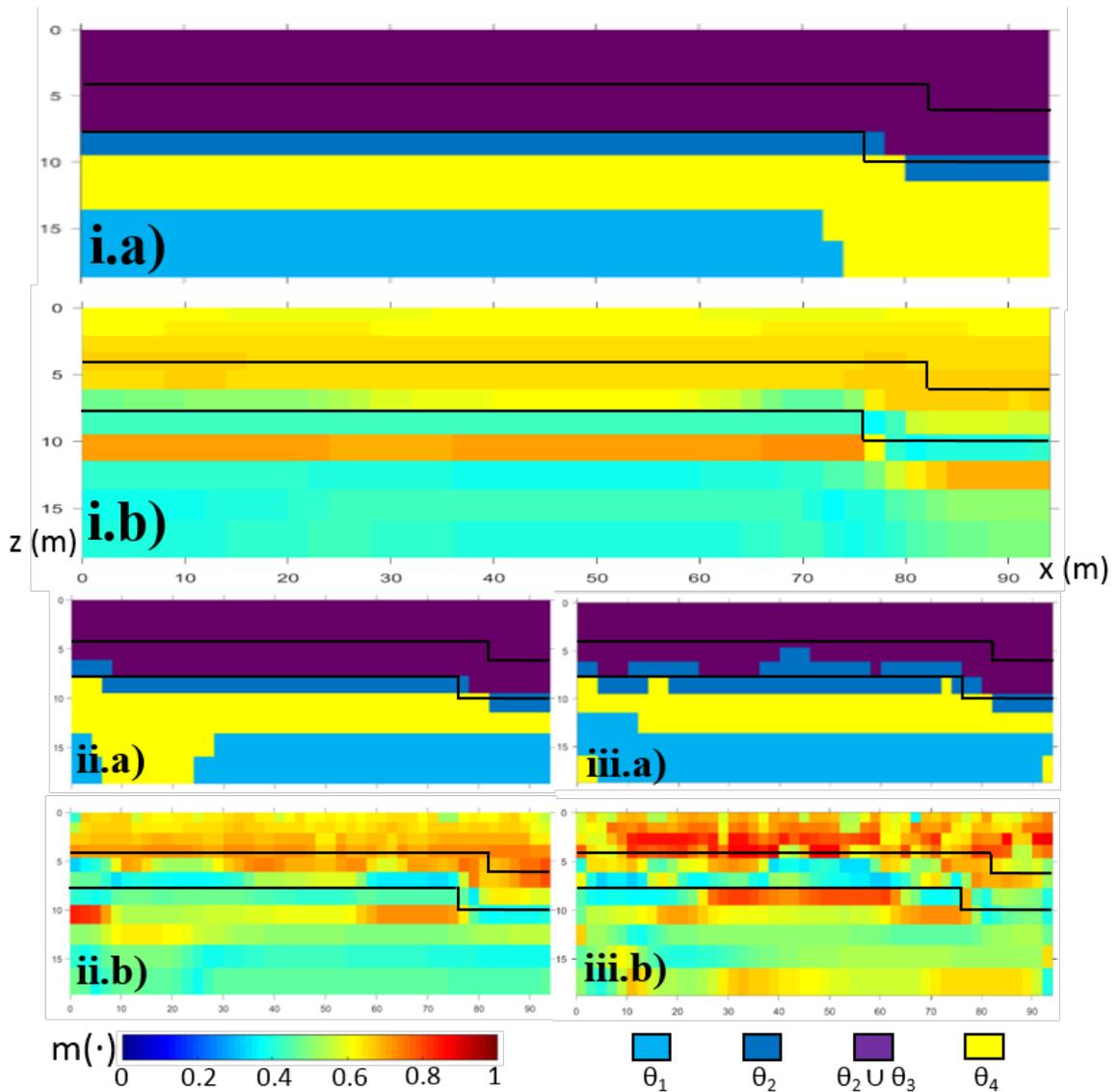


FIGURE III.5 – i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 1. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l'emplacement réel des interfaces entre les matériaux.

De manière générale, les masses de croyance associées aux hypothèses présentées Figure III.5.a ne sont pas très élevées (comprises entre 0.4 et 0.7 environ), à part localement pour un niveau de bruit de 15% (Figure III.5.iii.b). Le niveau de bruit ne semble pas affecter beaucoup les résultats issus de la méthodologie d'attribution des masses de croyance si ce n'est que l'hétérogénéité des valeurs de masses de croyance représentées Figures III.5.b augmente avec le niveau de bruit. L'interface entre les hypothèses  $\theta_2 \cup \theta_3$  et  $\theta_2$  semble également moins franche lorsque les niveaux de bruit augmentent (Figures III.5.ii.a et iii.a).

Les figures suggèrent que du matériau intermédiaire,  $\theta_2$ , est présent sous l'interface  $\theta_1/\theta_2$ , là où devrait normalement se situer le matériau fin  $\theta_1$ . Cela s'explique par le fait que les résultats issus de l'inversion ne localisent pas correctement l'interface et ne le font pas de manière franche. Cependant, les masses de croyance associées à l'hypothèse  $\theta_2$  mal localisée, sont faibles.

## 5.2 Méthode 2 : distances de Hausdorff

La méthode 2 repose exclusivement sur le calcul des distances de Hausdorff. Les résultats de l'attribution des masses de croyance géophysiques sont présentés Figure III.6. Il apparaît que cette deuxième méthode caractérise aussi bien le premier ensemble géologique, correspondant à  $\theta_2 \cup \theta_3$ , que la première méthode.

En revanche, l'ensemble géologique fin,  $\theta_1$ , est très mal caractérisé puisque cette hypothèse n'a la plus grande masse associée pour aucune maille de la section pour de faibles niveaux de bruit (0 et 5%) (Figures III.6.i.a et ii.a). C'est en effet un matériau géologique « autre »,  $\theta_4$ , qui transparait. En revanche, bien que les masses de croyance associées soit très faibles, pour un niveau de bruit plus important, l'hypothèse  $\theta_1$  est caractérisée (Figure III.6.iii.a).

Les valeurs de masses de croyance (Figure III.6.b) associées aux hypothèses majoritaires sont légèrement plus faibles que les valeurs proposées par la méthode 1 (Figure III.5.b). Les résultats suggèrent par ailleurs une très faible confiance au niveau de l'interface  $\theta_2/\theta_1$  ainsi qu'en base de section.

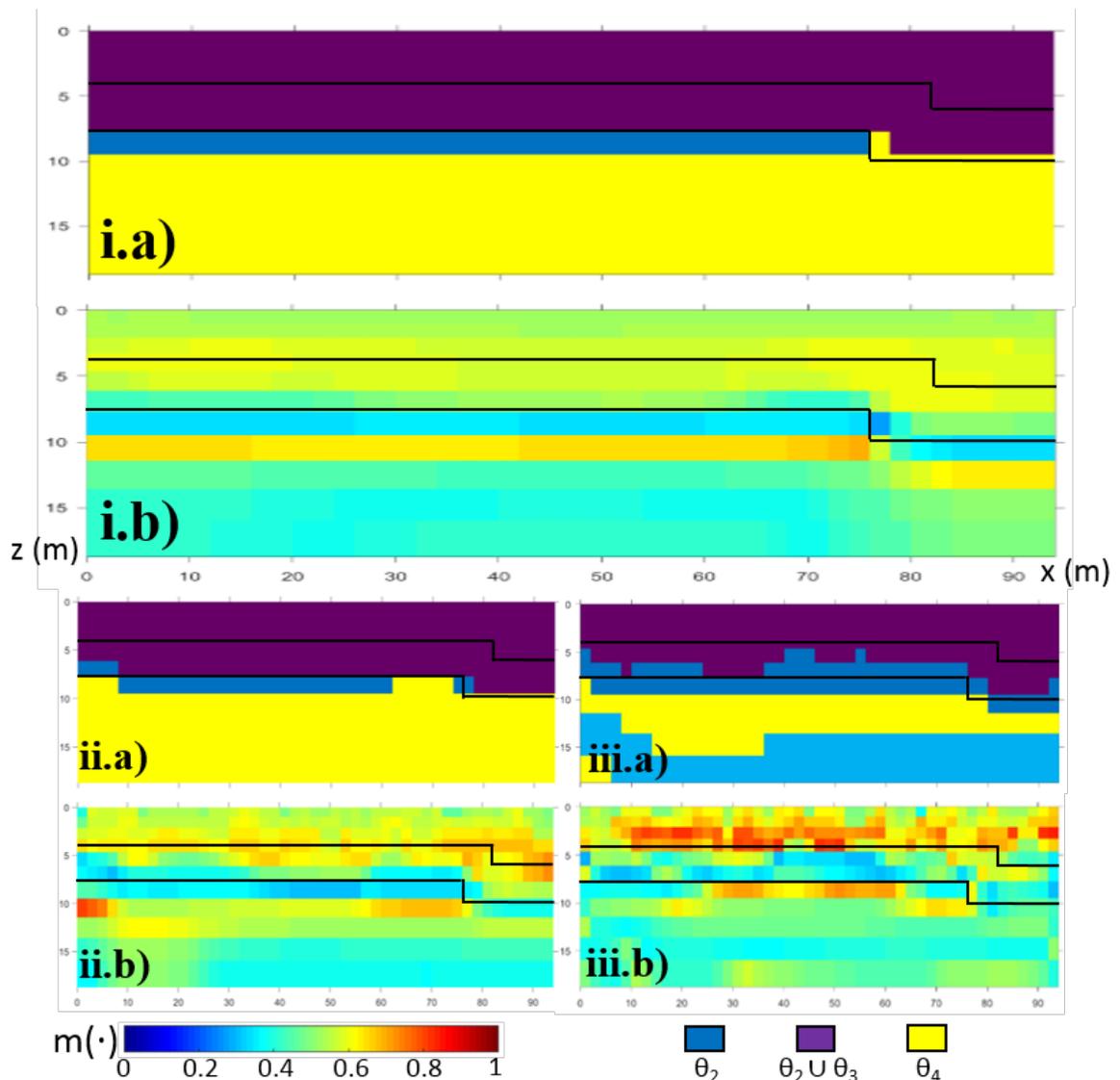


FIGURE III.6 – i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l’attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 2. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l’emplacement réel des interfaces entre les matériaux.

### 5.3 Méthode 3 : distances de Wasserstein et classes concernées

La troisième méthode d’attribution de masses de croyance géophysiques considère une répartition de la moitié de la masse à attribuer à l’aide des distances de Wasserstein et une répartition de la moitié restante en fonction de l’intervalle dans lequel se trouve la valeur de résistivité inversée. Les résultats sont proposés Figure III.7.

Cette méthode caractérise beaucoup mieux les ensembles géologiques que la méthode 1 qui considère une répartition de la masse uniquement à partir des distances

de Wasserstein. En effet, l'hypothèse  $\theta_2 \cup \theta_3$  a la plus grande masse associée (Figure III.7.a) là où elle a été définie (Figure III.2) et la présence de matériau de granulométrie intermédiaire,  $\theta_2$ , est même suggérée ponctuellement là où il est supposé se trouver (Figure III.7.ii.a et iii.a). Cette présence de  $\theta_2$ , bien que non définie dans le modèle géoélectrique initialement construit (Figure III.2), correspond à la réalité du modèle de sous-sol que l'on souhaite retrouver à l'issue de la fusion (Figure III.1).

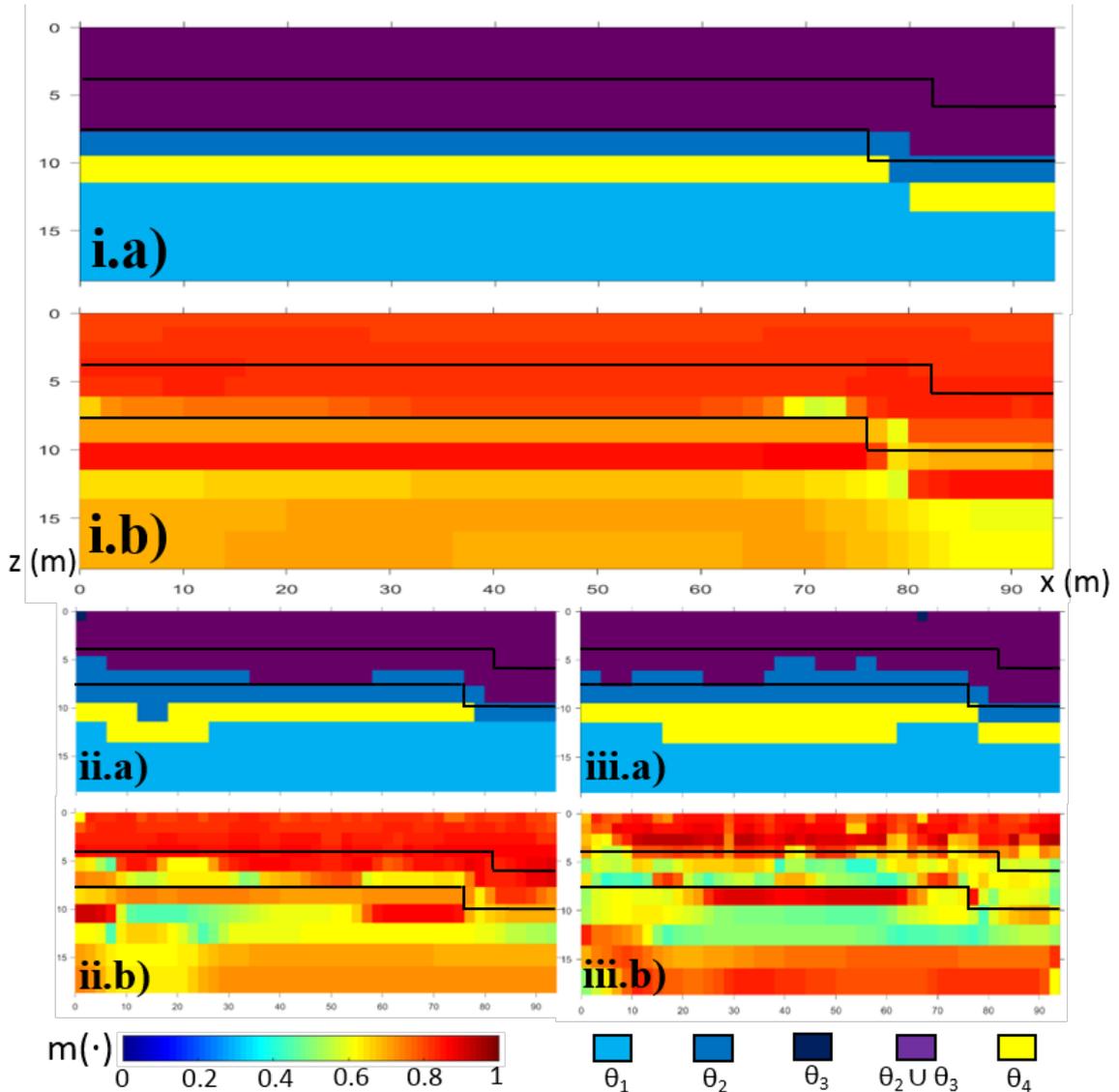


FIGURE III.7 – i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 3. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l'emplacement réel des interfaces entre les matériaux.

Quel que soit le niveau de bruit, le matériau géologique « autre », caractérisé par l'hypothèse  $\theta_4$ , est moins souvent majoritaire que pour les méthodes 1 et 2 et le matériau fin est mieux caractérisé. Pour quelques cellules proches de la surface, le

matériau grossier,  $\theta_3$ , est représenté (à différents endroits pour 5 et 15% de bruit) avec une masse de croyance associée relativement plus faible que celles associées à l'hypothèse  $\theta_2 \cup \theta_3$ .

Enfin, la confiance associée (Figure III.7.b) aux hypothèses ayant la plus grande masse de croyance est globalement plus grande que pour les deux méthodes précédentes (de l'ordre de 0.4 pour les plus faibles et entre 0.8 et 0.9 pour les plus élevées).

#### 5.4 Méthode 4 : distances de Wasserstein et aire sous la Gaussienne

La méthode 4 est proche de la méthode 3 en matière de fonctionnement (Chapitre II Section B.3.4.) mais également en ce qui concerne les résultats proposés (Figure III.8).

A titre de comparaison, pour ce qui concerne les hypothèses ayant les plus grandes masses de croyance, la différence n'est représentée sur la Figure III.8.ii.a (associée à un niveau de bruit de 5%) que pour une seule cellule à  $x \approx 15$  m, entre 10 et 11 m de profondeur. Le matériau y est caractérisé comme correspondant à l'hypothèse  $\theta_4$  alors que la méthode 3 le caractérise comme correspondant à l'hypothèse  $\theta_2$ . Toujours en comparant avec les résultats issus de la méthode 3, les hypothèses ayant les plus grandes masses associées sont exactement les mêmes lorsque les données sont non bruitées (Figure III.8.i.a). Pour un niveau de bruit de 15% (Figure III.8.iii.a), les différences sont également minimales avec seulement quelques cellules se voyant attribuées une hypothèse différente de ce qui était proposé avec la méthode 3.

Les valeurs de masses de croyance associées sont très proches de celles de la méthode 3, quoique légèrement plus faibles. Cette méthode est donc plus prudente. Cette prudence s'explique par le fait que la masse de croyance est répartie sur les hypothèses du FoD, en fonction du taux de recouvrement de l'aire sous la gaussienne avec les classes de valeurs associées aux différentes hypothèses de matériaux. En revanche, dans le cadre de la méthode 3, la masse est répartie en considérant uniquement un recouvrement de l'intervalle de résistivités inversées (moins large que l'aire sous la gaussienne calculée).

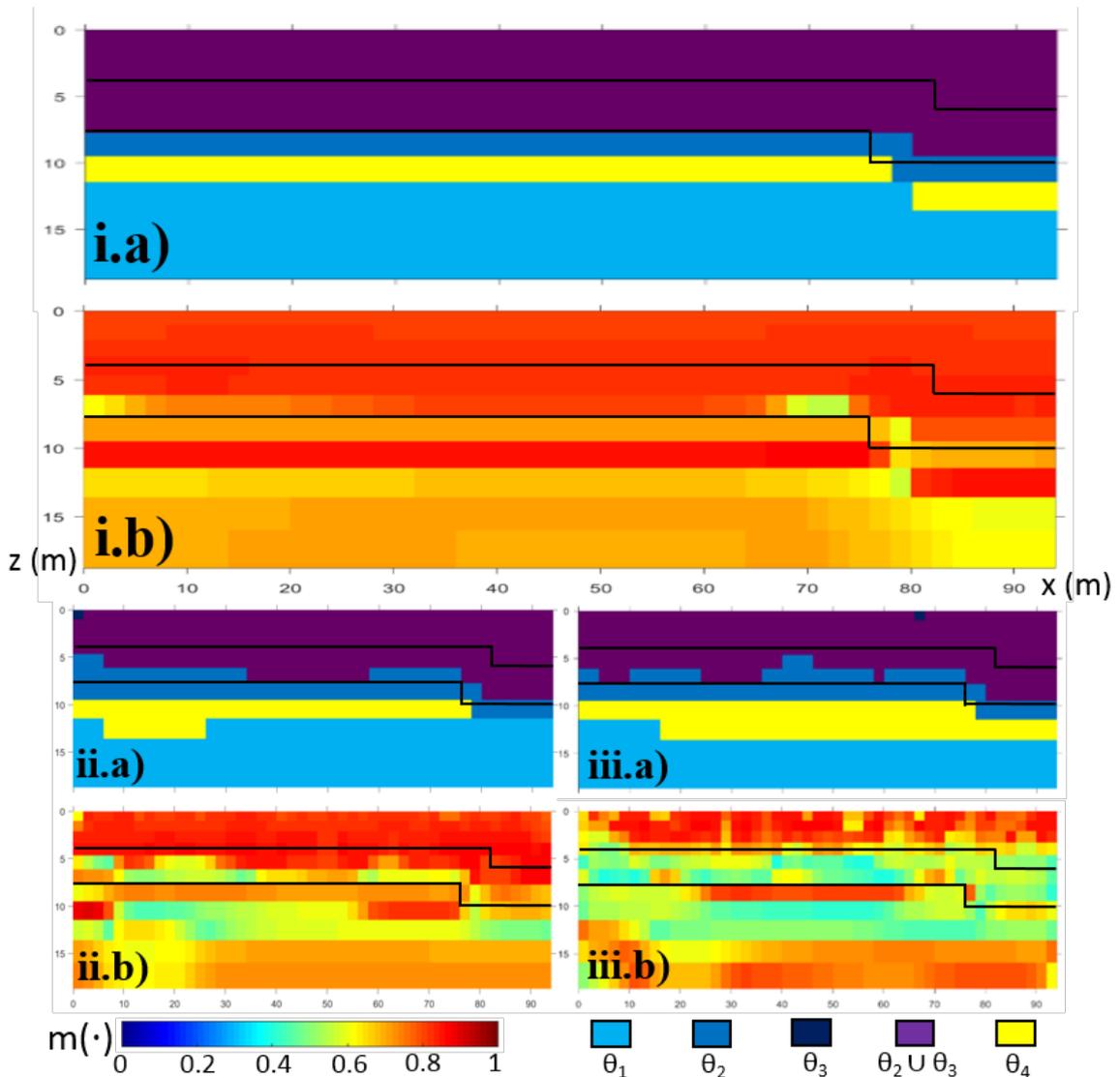


FIGURE III.8 – i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l’attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 4. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l’emplacement réel des interfaces entre les matériaux.

### 5.5 Méthode 5 : Aire sous la Gaussienne

La méthode 5 ne prend en considération que l’aire sous la gaussienne pour répartir les masses de croyance sur les différentes hypothèses du FoD, les résultats sont présentés Figure III.9. Quel que soit le niveau de bruit, les ensembles géologiques ne sont pas mieux définis qu’avec les méthodes précédemment présentées. En revanche, les masses de croyance associées sont extrêmement importantes (tendant vers  $m(\cdot) = 1$  pour la plupart). Rappelons ici qu’une masse de  $m(\cdot) = 1$  correspond à une certitude absolue que l’hypothèse concernée correspond à la réalité. Cependant, ces masses diminuent avec l’augmentation du niveau de bruit. L’imprécision

associée aux données étant plus importante lorsque le niveau de bruit augmente, la gaussienne considérée recouvre alors un intervalle de valeurs plus conséquent.

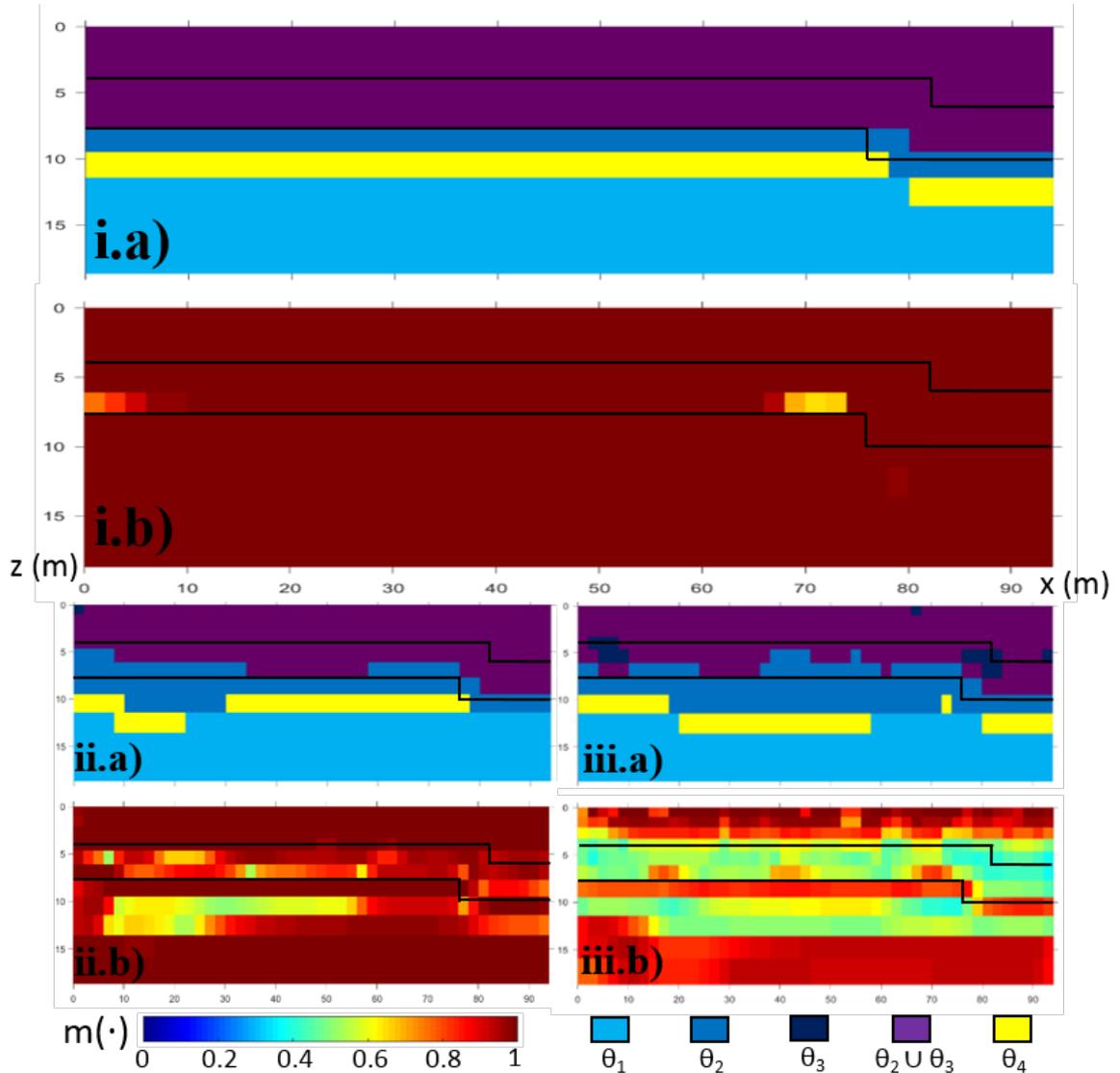


FIGURE III.9 – i) Sans bruit, ii) niveau de bruit de 5%, iii) niveau de bruit de 15%. a) Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l’attribution des masses de croyance géophysiques par utilisation de la méthode 5. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Les lignes noires représentent l’emplacement réel des interfaces entre les matériaux.

Une telle méthode d’attribution des masses de croyance géophysiques, si elle était retenue, donnerait trop d’importance à l’information issue de la source géophysique et laisserait alors trop peu de poids à l’information géotechnique lors du processus de fusion.

## 5.6 Discussion

Les sections de sous-sol présentées permettent de mettre en avant les intérêts et limites de chaque méthode d'attribution de masses de croyance. Ainsi, il apparaît que l'utilisation des distances de Wasserstein (méthode 1, Figure III.5) soit plus pertinente que l'utilisation des distances de Hausdorff (méthode 2, Figure III.6) qui caractérise très mal le matériau correspondant à l'hypothèse  $\theta_1$ . Nous choisissons donc de mettre de côté le calcul des distances de Hausdorff pour retenir celle de Wasserstein.

Afin de garantir que l'hypothèse ayant la plus grande masse de croyance soit celle dont l'intervalle de valeurs associé contient l'intervalle de résistivités inversées considéré, une répartition pour moitié de la masse de croyance, à l'aide du calcul des distances de Wasserstein, semble adéquate (méthodes 3 et 4, Figures III.7 et III.8). Il semble cependant que la méthode 4 soit plus appropriée que la méthode 3. En effet, cette méthode est plus prudente puisqu'elle propose une distribution des masses de croyance en fonction de la répartition de l'aire sous la gaussienne. Cette distribution semble plus naturelle que celle proposée par la méthode 3.

En ce qui concerne la méthode 5 (Figure III.9), une masse bien trop importante est fixée sur l'hypothèse associée à l'intervalle de valeurs physiques dans lequel se trouve l'intervalle de résistivités considéré. Ainsi, si une anomalie présente dans le sous-sol vient perturber l'acquisition et/ou que les résultats issus de l'inversion vont à contre-sens de la réalité du sous-sol, une masse trop importante sera attribuée à une hypothèse fautive et l'information issue de la source géotechnique ne sera pas en mesure de compenser cette mauvaise information. Cette méthode d'attribution de masses de croyance géophysiques n'est pas suffisamment prudente.

Cette étude synthétique nous a permis de mettre en avant les intérêts et limites de chaque méthode d'attribution des masses de croyance géophysiques et de justifier notre choix de retenir la **méthode 4** dans la suite de ce manuscrit de thèse. De plus, l'utilisation de trois jeux de données différents met en avant le fait que les méthodologies proposées gèrent correctement les différents niveaux de bruits utilisés (0, 5 et 15 %).

## 6 Construction d'un modèle géotechnique et caractérisation du cadre de discernement

Le modèle géotechnique est construit (Figure III.10) tel que quatre sondages équidistants soient simulés, en considérant un espacement de 25 m. Les sondages sont simulés jusqu'à 14 m de profondeur avec acquisition d'une valeur de résistance de pointe tous les 25 cm. La largeur des sondages est de 10 cm et les essais au CPT sont considérés en capacité de distinguer les trois matériaux du modèle proposé (Figure III.1). Les classes de valeurs physiques (en MPa) associées aux hypothèses du cadre de discernement pour la méthode du CPT reposent sur les valeurs proposées par le diagramme de Robertson (Figure II.12), et sont les suivantes :

$]0.14, 0.7]$  associée à l'hypothèse  $\theta_1$ ,  
 $]0.7, 25]$  associée à l'hypothèse  $\theta_2$ ,  
 $]25, 100]$  associée à l'hypothèse  $\theta_3$ ,  
 $[0.1, 0.14]$  associée à l'hypothèse  $\theta_4$ .

Comme pour les simulations géotechniques proposées au Chapitre II, les valeurs dans les sondages sont tirées aléatoirement en suivant une loi normale avec des valeurs moyennes pour les classes associées à  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$  respectivement de 0.42, 12.85 et 62.5 MPa. L'écart-type associé est ici égal à 10% de la valeur moyenne fixée, tout comme le niveau d'imprécision sur la valeur de  $q_c$ .

Ainsi, parmi les quatre sondages simulés, les trois premiers (de gauche à droite) caractérisent la présence d'interfaces à 4 et 8 mètres de profondeur. Le quatrième sondage étant localisé au niveau de la variation d'épaisseur des ensembles géologiques, caractérise les interfaces à 6 et 10 mètres de profondeur.

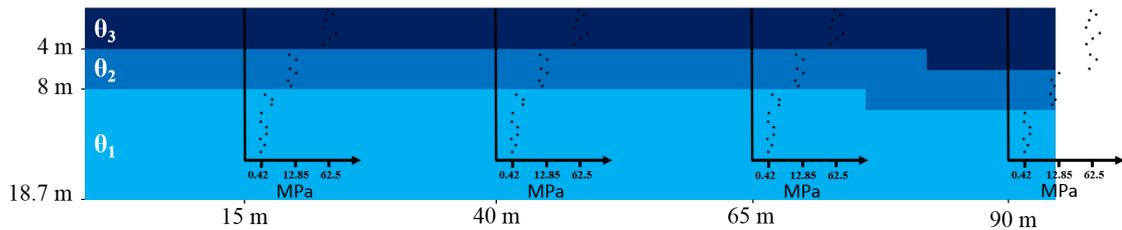


FIGURE III.10 – Représentation des sondages simulés au CPT sur la section de sous-sol considérée et leurs résistances de pointe associées (MPa).

## 7 Résultats de l'attribution des masses de croyance en fonction de la masse de croyance dans le sondage

Comme décrit au Chapitre II, Section B.4.3., l'utilisateur doit fixer une valeur de masse de croyance initiale ( $M(0)$ ) dans le sondage, qui sera attribuée à l'hypothèse dont l'intervalle de valeurs associé contient la valeur de résistance de pointe considérée. Ce choix doit être fait à dire d'experts. En choisissant un facteur de décroissance latérale neutre, tel que  $k = 1$ , et un processus de fusion entre les sondages (Chapitre II, Section B.4.4.2.), nous comparons ici l'impact de quatre distributions distinctes de masses de croyance dans les sondages.

### 7.1 $M(0)=0.25$

Dans un premier temps, nous proposons de fixer une masse de croyance relativement faible sur l'hypothèse caractérisée par l'information géotechnique, telle que  $M(0) = 0.25$ . De cette façon, l'hypothèse associée à l'intervalle contenant la valeur de résistance de pointe, ne peut avoir la plus grande masse de croyance à aucun endroit de la section et n'est donc pas représentée sur la Figure III.11.a. L'hypothèse ayant la plus grande masse associée est alors, sur l'ensemble de la section,

l'hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4$ . En effet, tel qu'expliqué au Chapitre II, Section B.4.3., la masse complémentaire non attribuée à l'hypothèses caractérisée par le CPT, est allouée à l'incertitude globale.

Avec une telle masse fixée dans les sondages, il apparaît que la masse associée à l'union des hypothèses du FoD, est plus faible à proximité des sondages (Figure III.11.b). Au-delà de 14 m de profondeur, puisqu'aucune information géotechnique n'est disponible,  $m(\Theta) = 1$ . Puisque l'information diffère entre les sondages 3 et 4 au niveau de la variation d'épaisseur des couches, la confiance décroît plus vite entre les sondages et  $m(\Theta) = 1$  à nouveau.

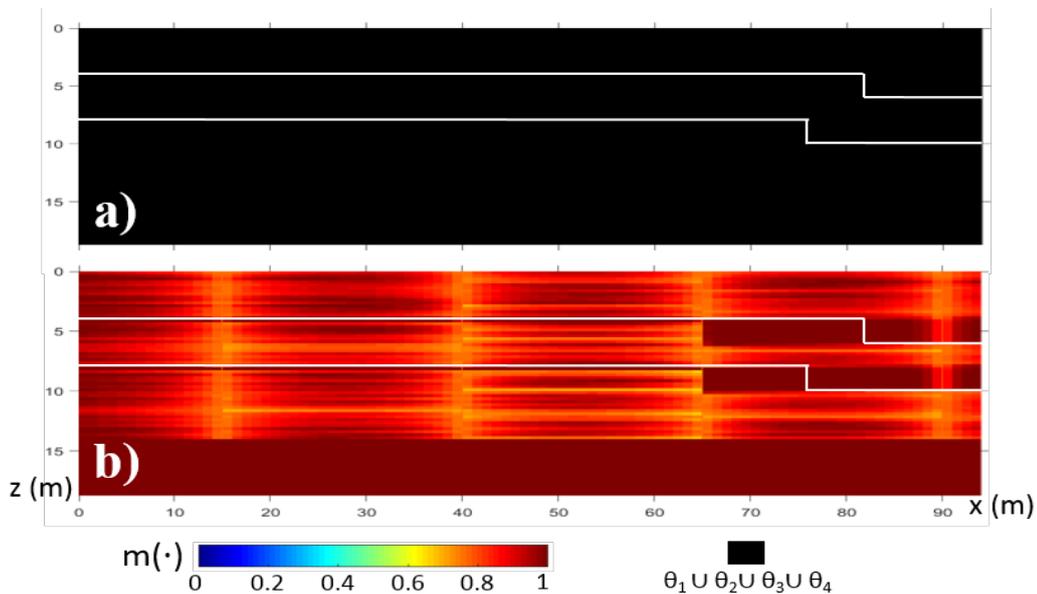


FIGURE III.11 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.25$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux.

## 7.2 $M(0)=0.5$

En considérant une masse de  $M(0) = 0.5$ , l'hypothèse associée à l'intervalle contenant la valeur de résistance de pointe mesurée devient l'hypothèse ayant la plus grande masse associée et transparait alors sur la Figure III.12.a. Les hypothèses autres que  $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4$  sont cependant rarement majoritaires au sein de la section et lorsqu'elles le sont, les masses de croyance associées sont faibles (proches de 0.5, Figure III.12.b).

A 10 m de profondeur, entre les sondages 2 et 3, l'hypothèse  $\theta_1$  est majoritaire sur toute la largeur car les valeurs de  $q_c$  des sondages 2 et 3, à cette profondeur, sont très proches (cela est à imputer au tirage aléatoire des valeurs). Le taux de décroissance calculé entre les deux sondages est donc faible.

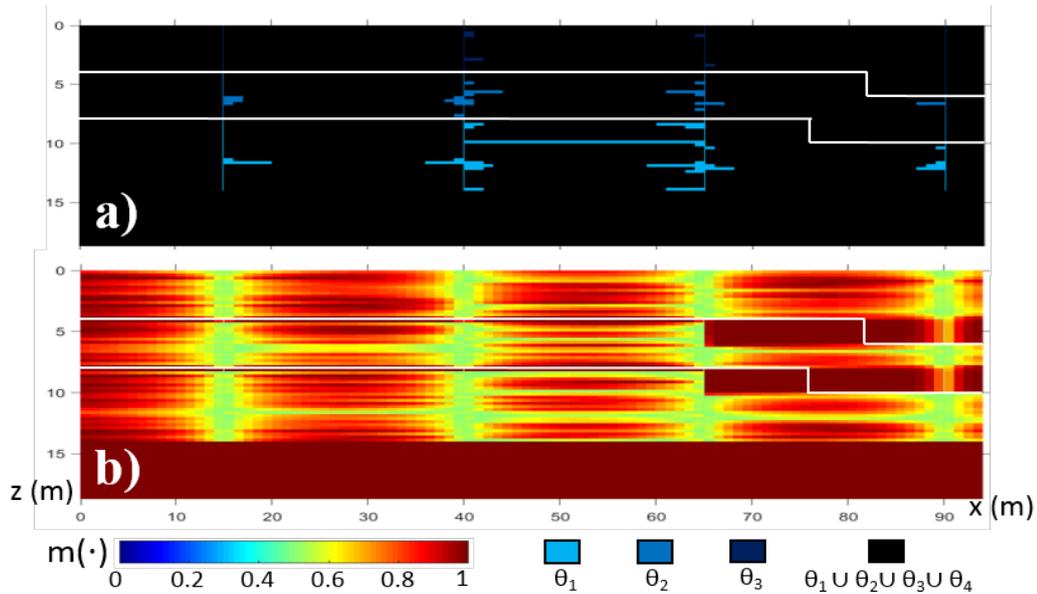


FIGURE III.12 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l’attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.5$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l’emplacement réel des interfaces entre matériaux.

### 7.3 $M(0)=0.75$

Pour une masse de croyance, encore plus importante, fixée à  $M(0) = 0.75$ , la section de sous-sol est mieux caractérisée (Figure III.13.a). En revanche, comme pour la Section B.7.2., l’anomalie d’épaisseur entre les sondages 3 et 4 induit une décroissance latérale rapide de la confiance, et donc une moins bonne caractérisation à son niveau.

Les hypothèses du cadre de discernement, correspondant aux matériaux géologiques, ont la plus grande masse de croyance associée sur environ 5 mètres autour du sondage avec cependant des différences notables lorsque la valeur de  $q_c$  est proche de celle relevée dans le sondage voisin. Il est à noter qu’au niveau des interfaces, la confiance décroît très vite et l’hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4$  a alors la plus grande masse associée. Ceci s’explique par le fait que le coefficient de décroissance est calculé à partir des 3 mailles du sondage voisin, situées à même profondeur. Ainsi, au niveau des interfaces, la valeurs de  $q_c$  étant sensiblement différentes d’une couche géologique à l’autre, la confiance décroît de manière brutale.

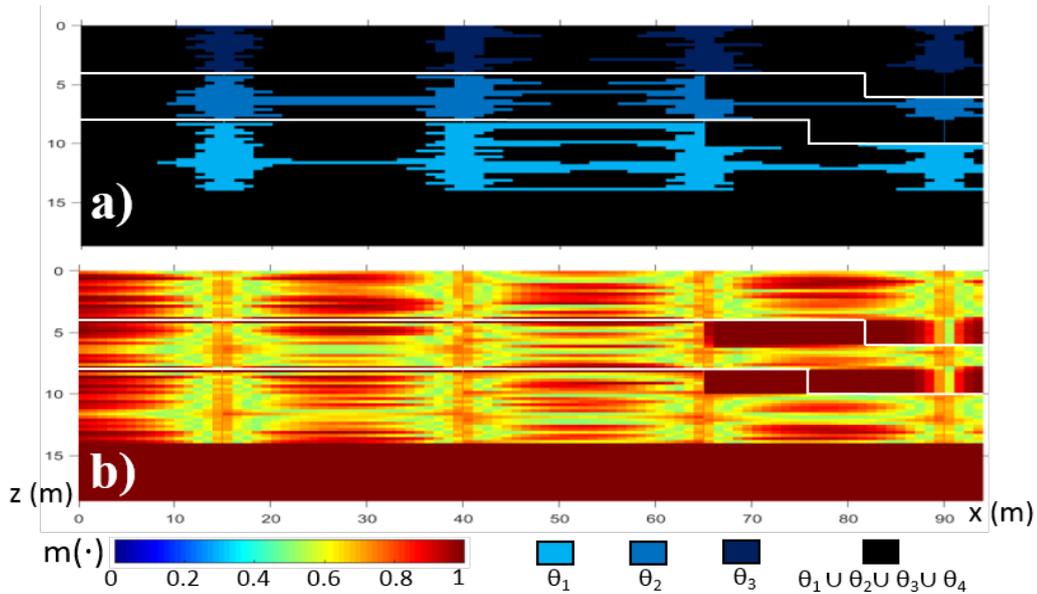


FIGURE III.13 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l’attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.75$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l’emplacement réel des interfaces entre matériaux.

#### 7.4 $M(0)=0.99$

Nous considérons ici une valeur de masse de croyance intrasondage, sur l’hypothèse caractérisée par la méthode CPT, de  $M(0) = 0.99$ . Cette valeur signifie que la caractérisation du matériau au niveau des sondages est quasi certaine. Les résultats associés sont présentés Figure III.14. Une telle valeur permet de mieux caractériser une plus grande surface de la section et d’associer des masses de croyance proches de 1 sur un rayon d’un mètre autour des sondages.

Nous ne proposons pas de résultats pour une valeur de masse de  $M(0) = 1$  pour deux raisons. Premièrement, il est difficilement concevable qu’une valeur physique puisse renseigner sur la nature d’un matériau avec une certitude de 100%. Deuxièmement, si une masse égale à 1 est associée à une hypothèse de  $\Theta$ , un niveau de conflit total est potentiellement envisageable lors de la fusion avec les informations issues des autres sources (géophysiques ou géotechniques). Un conflit total entraînerait alors automatiquement l’impossibilité d’utiliser la normalisation de Dempster-Shafer (qui impliquerait une division par 0, Eq II.3).

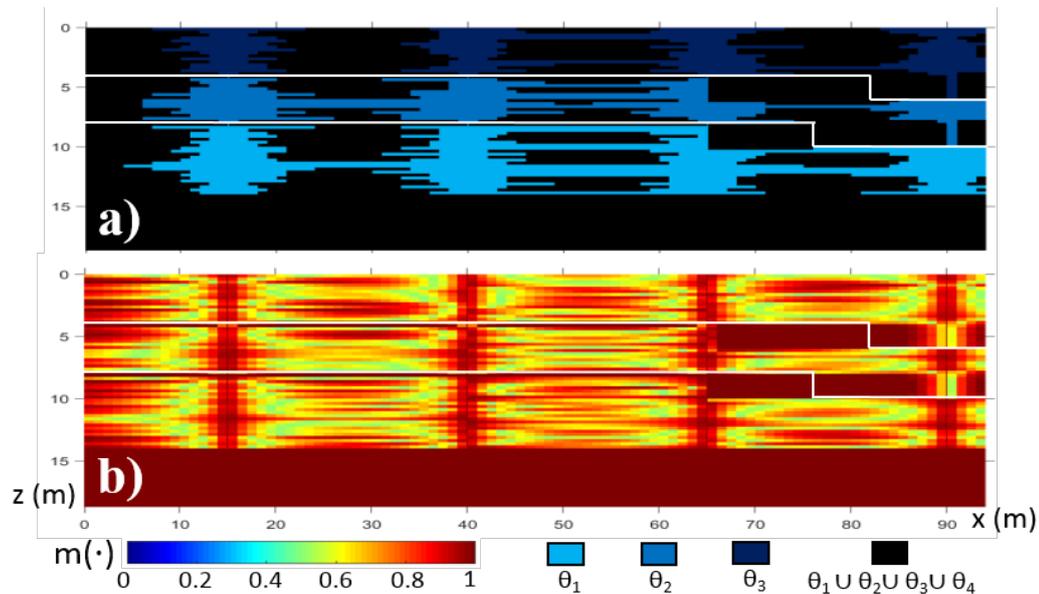


FIGURE III.14 – a)Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l’attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l’emplacement réel des interfaces entre matériaux.

## 7.5 Discussion

Les résultats présentés en utilisant différentes valeurs de masse de croyance au niveau des sondages, associée aux hypothèses du FoD, permettent de mieux saisir l’impact d’un choix de valeur par rapport à un autre.

Ainsi, une masse inférieure à 0.5 implique nécessairement que l’hypothèse identifiée dans les sondages n’apparaisse jamais comme ayant la plus grande masse de croyance au sein de la section. Pour une valeur de masse égale à 0.5, l’hypothèse retenue apparaîtra essentiellement au niveau des sondages. Plus la masse tend vers 1 et plus l’hypothèse caractérisée dans les sondages aura la plus grande masse de croyance sur de grandes distances, depuis le point de mesure jusqu’au sondage voisin, en gardant bien à l’esprit qu’une valeur de 1 ne peut être utilisée.

Pour une utilisation sur site réel, cette valeur de masse devrait pouvoir être fixée à dire d’experts en fonction de la méthode géotechnique employée et de sa **capacité à caractériser correctement les ensembles géologiques** de la section. Ainsi, une méthode géotechnique prélevant les échantillons et permettant à l’observateur de les identifier, pourrait se voir associer une masse de croyance intra-sondage plus importante qu’une méthode intrusive renseignant sur un paramètre physique, qui ne permet pas d’identifier le matériau concerné de manière fiable et précise.

## 8 Résultats de l'attribution des masses de croyance en fonction de $k$

En-dehors de la valeur de masse de croyance fixée dans les sondages, il est également possible pour l'utilisateur de notre méthodologie, de fixer la valeur d'un coefficient de décroissance latérale de la masse de croyance, noté  $k$  (détails Chapitre II, Section B.4.3.). Nous présentons ici les résultats de l'attribution de masses de croyance géotechniques, pour différentes valeurs de  $k$ , associés à une masse de croyance importante de  $M(0) = 0.99$  fixée dans les sondages (permettant de mieux visualiser l'impact sur les résultats pour différentes valeurs de  $k$  en partant d'une masse de croyance élevée) et à un processus de fusion entre les sondages.

### 8.1 $k=0.25$

Pour un faible coefficient de décroissance fixé à  $k = 0.25$ , les hypothèses ayant la plus grande masse de croyance, représentées Figure III.15.a permettent de représenter dans sa quasi intégralité la section telle qu'elle est réellement (Figure III.1), avec des masses de croyance associées relativement importantes III.15.b. L'hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4$  a cependant la plus grande masse de croyance associée, au niveau de la variation d'épaisseur des matériaux.

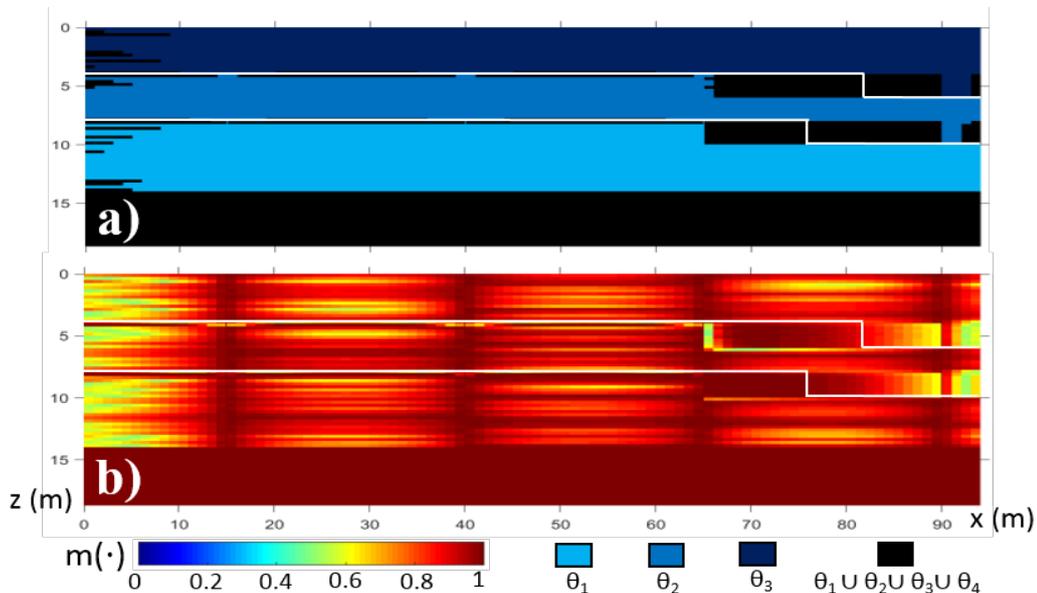


FIGURE III.15 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 0.25$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux.

Les masses de croyance les plus faibles se retrouvent essentiellement en bout de section, à gauche du premier sondage. Cela s'explique par le fait qu'aucun sondage n'est présent à la gauche du premier sondage, ce qui aurait éventuellement pu

permettre de contraindre l'information.

### 8.2 $k=0.5$

Pour une valeur de  $k$  deux fois plus importante ( $k = 0.5$ ), les résultats sont présentés Figure III.16. La confiance, associée aux hypothèses du FoD, décroît depuis les sondages plus rapidement que pour une valeur de  $k$  égale à 0.25 et l'incertitude sur l'ensemble des hypothèses représentée par  $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4$  commence à devenir majoritaire entre les sondages. La section de sous-sol demeure cependant très bien caractérisée, avec des masses de croyance cependant plus faibles que celles présentées Figure III.15.

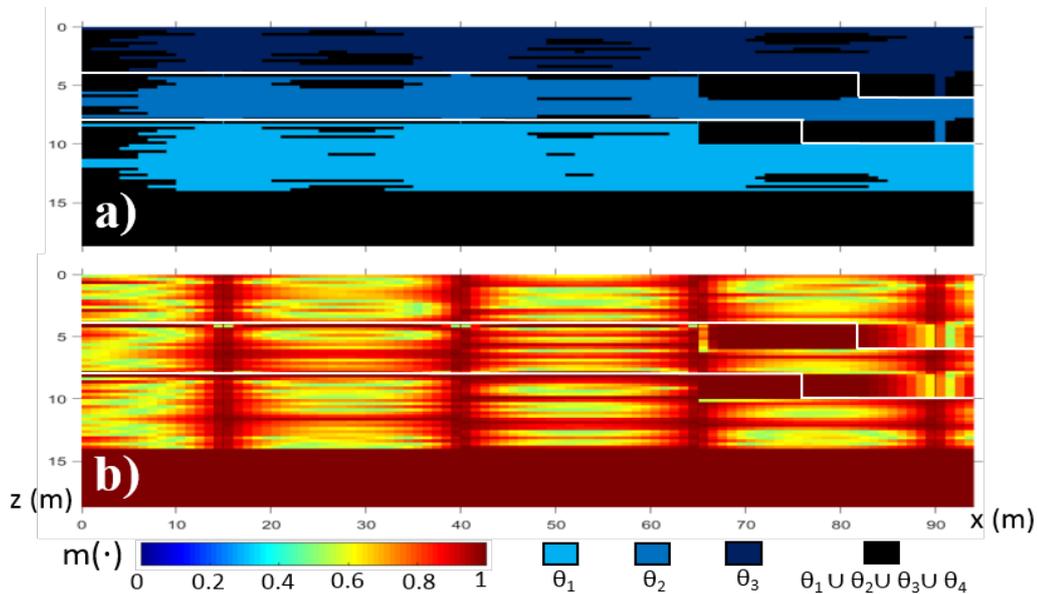


FIGURE III.16 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 0.5$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux.

### 8.3 $k=1$

Pour une valeur de  $k = 1$ , les résultats sont représentés Figure III.14 et décrits Section B.7.4. Les masses de croyance, associées aux hypothèses caractérisées dans les sondages, décroissent encore plus rapidement et les fortes masses sont beaucoup plus localisées à proximité des sondages.

### 8.4 $k=2$

Pour une valeur de  $k = 2$ , l'hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4$  redevient prépondérante au sein de la section, imputée à la décroissance latérale rapide de la confiance. Les résultats sont présentés Figure III.17.

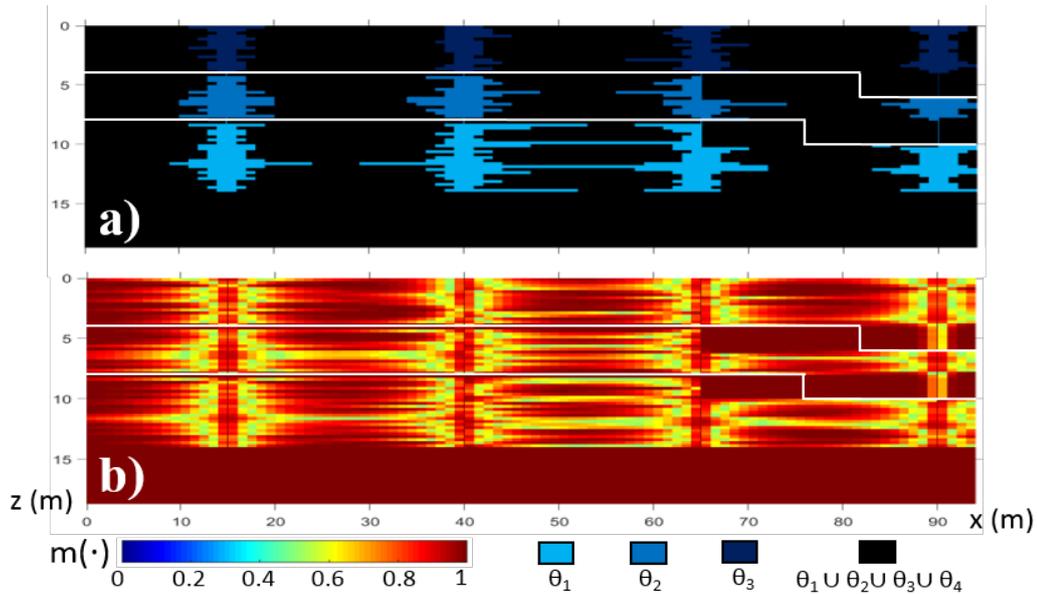


FIGURE III.17 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l’attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de fusion inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 2$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l’emplacement réel des interfaces entre matériaux.

### 8.5 Discussion

Les résultats présentés pour quatre valeurs du coefficient latéral de décroissance  $k$ , montrent que plus la valeur de  $k$  est grande, plus la confiance dans l’information prodiguée par les résultats du sondage, décroît rapidement. Dans tous les cas, la confiance décroît drastiquement au niveau des interfaces ainsi qu’entre les sondages 3 et 4, là où l’épaisseur des matériaux géologiques varie.

Sur site réel, la valeur de ce coefficient de décroissance devrait être fixée en fonction de la connaissance du terrain ausculté et de son homogénéité dans l’espace. Il n’y a donc pas de lien établi entre la valeur du coefficient  $k$  et la capacité de la méthode géotechnique à caractériser un matériau. Ainsi, un milieu géologique fortement variable devrait se voir affecter un coefficient  $k$  plus grand qu’un milieu très homogène horizontalement, pour lequel l’information géotechnique peut être étendue avec plus de confiance.

La valeur du coefficient doit être fixée à dire d’experts en fonction de la connaissance du terrain. Il est possible de visualiser en amont de l’attribution des masses de croyance géotechniques, la fonction de décroissance exponentielle (Eq II.23). Cela pourrait aider à fixer la valeur de  $k$  en estimant à partir d’une valeur de masse de croyance intrasondage connue, jusqu’à quelle distance, l’hypothèse considérée est celle ayant la plus grande masse de croyance associée. Phoon and Kulhawy (1999) suggèrent une valeur moyenne d’échelle de fluctuation horizontale des matériaux de 47.9 mètres pour  $q_c$ . Cette valeur reste cependant sujette à discussion au vu de

l'écart-type des valeurs proposées et du faible nombre d'études réalisées.

## 9 Résultats de l'attribution des masses de croyance à partir d'un processus de somme entre deux sondages

Les résultats précédemment présentés ont tous été réalisés en considérant un processus de fusion suivant une règle de normalisation de Dempster-Shafer (Eq II.1) entre les sondages. Cependant, un processus de somme (présenté Chapitre II, Section B.4.4.1.) avait initialement été proposé dans notre démarche de travail. Les résultats de l'attribution de masses de croyance géotechniques en considérant un processus de somme entre sondages sont représentés Figure III.18 (pour une masse intrasondage de  $M(0) = 0.99$ , et un coefficient  $k = 1$ ). Ces résultats sont très proches de ceux proposés Figure III.14, légèrement plus de poids est cependant octroyé aux hypothèses retenues dans les sondages.

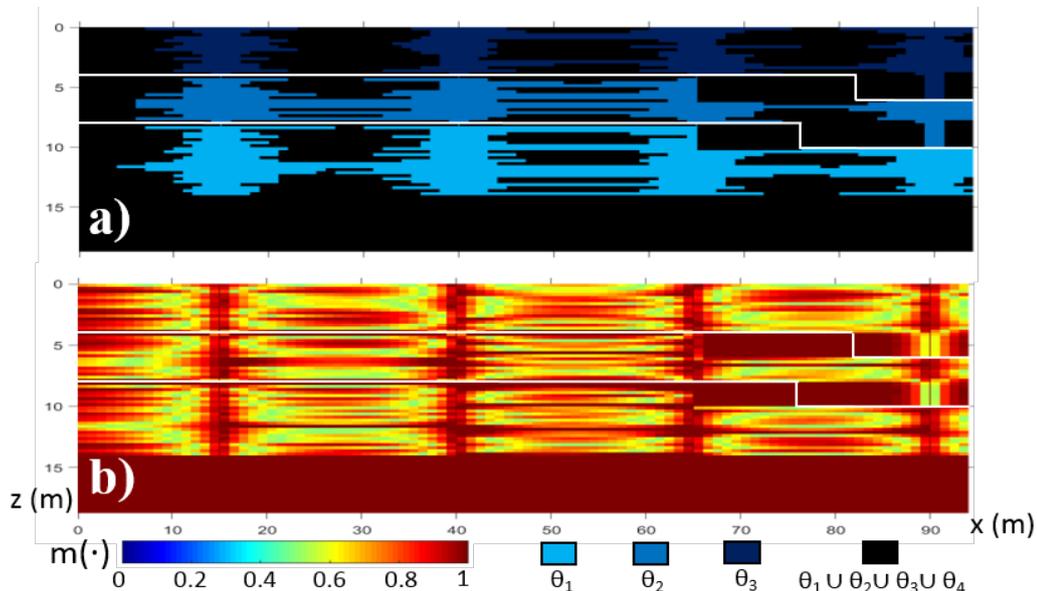


FIGURE III.18 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques, en considérant un processus de somme inter-sondages,  $M(0) = 0.99$  et  $k = 1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). La ligne blanche représente l'emplacement réel des interfaces entre matériaux.

Nous ne retiendrons pas cette manière de combiner l'information entre deux sondages par la suite puisqu'elle semble moins correcte d'un point de vue théorique. Elle pourrait en effet avoir tendance à surestimer l'information géotechnique. Nous préférons une démarche reposant sur un processus de fusion entre sondages, puisque l'ensemble de notre méthodologie repose sur un tel procédé. De cette manière, il est impossible d'obtenir une masse de croyance associée à une hypothèse de  $\Theta$ , entre les sondages, supérieure à la plus grande masse de croyance fixée par l'un des deux sondages.

## 10 Résultats à l'issue de la fusion

Après avoir présenté les résultats d'attribution des masses de croyance géophysiques et géotechniques en fonction de différentes méthodes et de différentes valeurs de paramètres, nous proposons ici de présenter quelques résultats de fusion. Nous faisons le choix de ne présenter des résultats de fusion uniquement issus de l'utilisation de la méthode 4 d'attribution des masses de croyance géophysiques. C'est en effet celle qui semble la plus pertinente (cf. Section 5.6) et que nous choisissons de conserver pour le reste de ce travail de thèse. Les comparaisons entre résultats ne porteront donc pas sur la méthode d'attribution des masses de croyance géophysiques.

De la même manière, avec les Figures III.19 et III.20, nous ne proposons les résultats que pour une seule règle de combinaison (PCR6). Ceci est fait afin de ne pas trop surcharger la section et de ne pas discuter des variations de résultats qui soient dépendantes de la règle de combinaison plutôt que des valeurs de paramètres retenues. Les résultats que nous présentons ici sont proposés pour deux valeurs de masses de croyance intrasondages ( $M(0) = 0.25$ , Figure III.19 et  $M(0) = 0.99$ , Figure III.20), correspondant à la plus petite et à la plus grande des valeurs présentées respectivement sections 3.1 et 3.4. Les résultats sont également présentés pour deux valeurs de  $k$  ( $k = 0.25$ , Figures III.19.ii, III.19.iv III.20.ii et III.20.iv et  $k = 2$ , Figures III.19.i, III.19.iii, III.20.i et III.20.iii), correspondant à la plus petite et à la plus grande des valeurs présentées respectivement sections 8.1 et 8.4. Enfin, deux niveaux de bruit ont été retenus : 0% (Figures III.19.i, III.19.ii, III.20.i et III.20.ii) et 15% (Figures III.19.iii, III.19.iv, III.20.iii et III.20.iv).

Concernant les résultats post-fusion, pour  $M(0) = 0.25$ ,  $k = 2$  et sans bruit (Figures III.19.i.a et III.19.i.b), les hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée sont les mêmes que celles retenues pour l'attribution de masses de croyance géophysiques seules (Figure III.8.i.a). La faible valeur de masse intrasondage et le taux de décroissance rapide de l'information géotechnique ne laisse en effet que très peu de place à l'information issue du CPT. Les masses de croyance associées aux hypothèses « majoritaires » (Figure III.19.i.b) laissent cependant ressortir la position des sondages et permettent de nuancer les masses attribuées par la géophysique seule (Figure III.8.i.b).

En conservant les mêmes valeurs de paramètres, mais pour un niveau de bruit plus important (15 %), les résultats post-fusion (Figure III.19.iii.a) sont également proches des résultats obtenus à l'issue de l'attribution des masses de croyance géophysiques seules (Figure III.8.iii.a). Comme pour les résultats associés à une absence de bruit, la position des sondages ressort également sur les masses de croyance associées aux hypothèses « majoritaires » (Figure III.19.iii.b) mais également sur les résultats de la Figure III.19.iii.a. Ceci s'explique par le fait que les masses de croyance géophysiques des hypothèses « majoritaires » sont plus faibles pour un niveau de bruit de 15% que pour une absence de bruit.

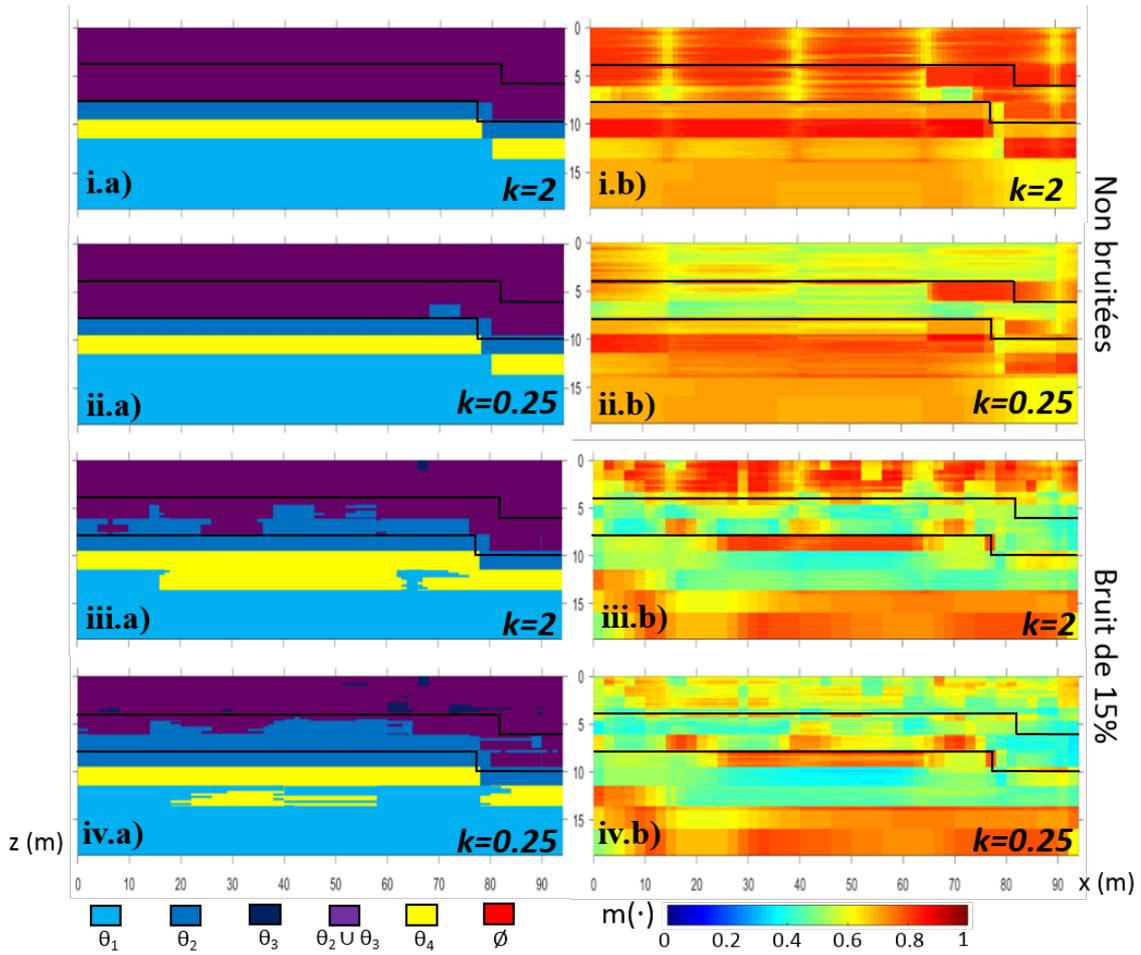


FIGURE III.19 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Masse de croyance intrasondage retenue de  $M(0) = 0.25$ . Résultats de fusion pour données géophysiques non bruitées et i)  $k = 2$ , ii)  $k = 0.25$ , et pour données géophysiques avec un bruit de 15% et iii)  $k = 2$  et iv)  $k = 0.25$ .

En conservant une même valeur de  $M(0) = 0.25$  mais pour des valeurs de  $k$  plus faibles ( $k = 0.25$ ), les résultats post-fusion obtenus pour des données géophysiques non bruitées (Figure III.19.ii.a) sont proches de ceux obtenus pour une valeur plus grande de  $k$  (Figure III.19.i.a). Les masses de croyance associées sont cependant assez différentes (Figure III.19.ii.b). Elles sont plus faibles là où l'information géotechnique n'est pas en accord avec l'information géophysique (caractérisation de  $\theta_2 \cup \theta_3$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_4$ ) et plus importantes lorsque l'information géotechnique est en accord avec l'information géophysique (caractérisation de  $\theta_1$ , entre les sondages 1 et 3, entre 11 et 14 m de profondeur).

Pour un niveau de bruit plus élevé, mais avec les mêmes valeurs de paramètres, l'hypothèse  $\theta_3$  est caractérisée (Figure III.19.iv.a) là où les masses de croyances géophysiques sont faibles (Figure III.8.iii.b). Il en va de même pour l'hypothèse  $\theta_4$  qui est moins présente entre 11 et 14 m de profondeur que pour une valeur de  $k = 2$

(Figure III.19.iii.a). Tout comme pour les résultats issus de données sans bruit, en comparant ces résultats post-fusion avec  $k = 2$  (Figure III.19.iv.b) aux résultats associés à  $k = 0.25$  (Figure III.19.iii.b), les masses de croyance sont plus faibles là où l'information géotechnique n'est pas en accord avec l'information géophysique et plus importantes lorsque les deux types d'information sont en accord.

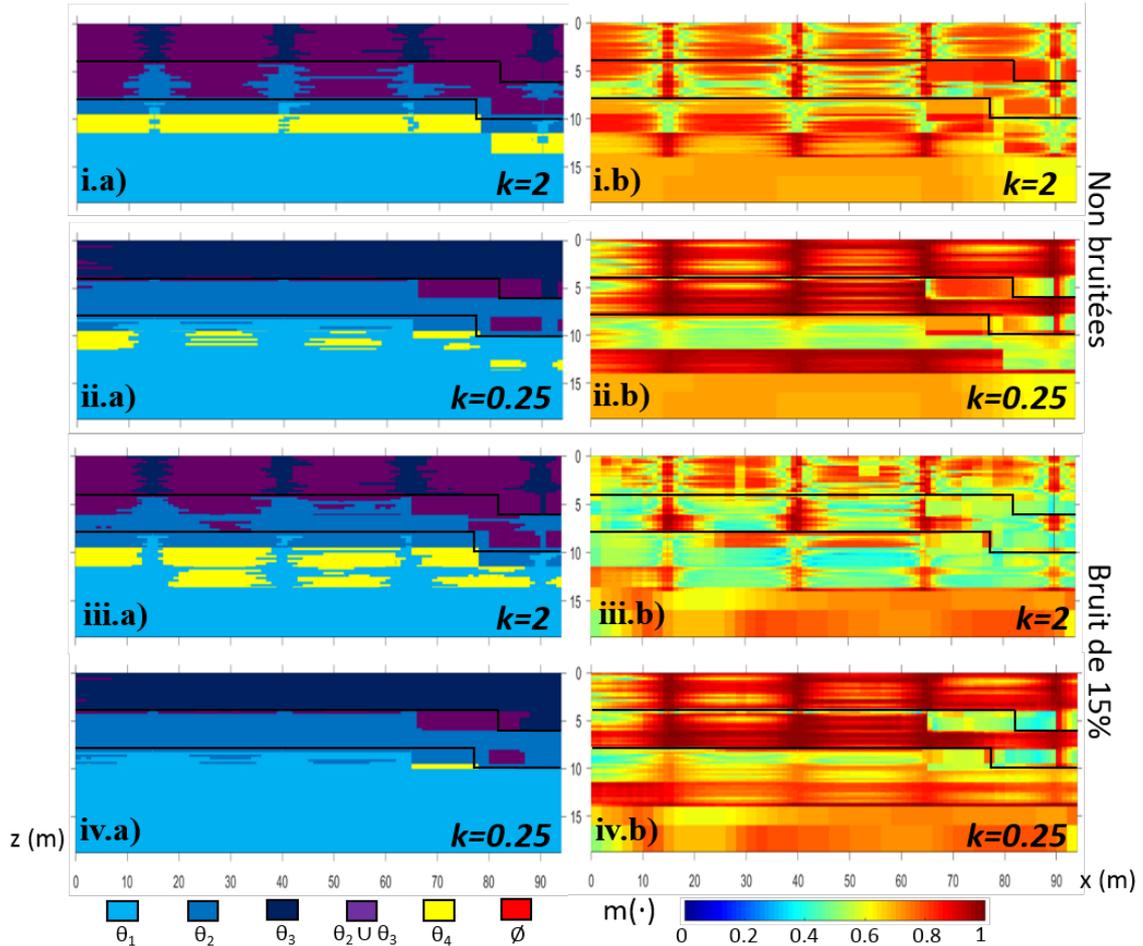


FIGURE III.20 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Masse de croyance intrasondage retenue de  $M(0) = 0.99$ . Résultats de fusion pour données géophysiques non bruitées et i)  $k = 2$ , ii)  $k = 0.25$ , et pour données géophysiques avec un bruit de 15% et iii)  $k = 2$  et iv)  $k = 0.25$ .

Les résultats obtenus pour une valeur de  $M(0) = 0.99$  (Figure III.20) sont globalement plus éloignés des résultats de l'attribution des masses de croyance géophysiques seules (Figure III.8) et semblent plus en accord avec le modèle proposé (Figure III.1). En effet, la position des sondages est plus mise en évidence que sur la Figure III.19 et l'hypothèse  $\theta_3$  que ne parvenait pas à caractériser la source géophysique seule ressort beaucoup plus (Figure III.20.a).

Pour une même valeur de  $M(0) = 0.99$  et de  $k = 2$ , la caractérisation de l'hypothèse  $\theta_1$  s'étend sur de plus grandes distances pour des données non bruitées

(Figure III.20.i.a), là où la géophysique caractérise l'hypothèse  $\theta_4$  (Figures III.8.i.a et III.8.iii.a), que pour des données bruitées à 15% (Figure III.20.iii.a). Il en est de même pour l'hypothèse  $\theta_2$ . Cela s'explique par le fait que la méthode d'attribution géophysique accorde une masse plus importante à l'hypothèse  $\theta_4$  lorsque il n'y a pas de bruit sur les données que lorsque il y a un niveau de bruit de 15%.

En retenant une valeur de  $k = 0.25$ , l'information géotechnique s'étend plus largement, à la fois lorsque le bruit est absent (Figure III.20.ii.a) et lorsqu'il est important (Figure III.20.iv.a). La section est presque correctement caractérisée dans son intégralité. La source géotechnique a alors un poids important, cela se visualise nettement sur les Figures III.20.b.

L'ensemble de ces résultats nous permet de mieux comprendre l'implication de chaque paramètre dans le processus de fusion. Ils mettent également en avant le fait que la méthodologie développée arrive à limiter les effets négatifs du bruit sur les données géophysiques. Comme dit plus haut, nous restons cependant conscients que ces résultats ne proviennent que d'un seul exemple et qu'ils n'ont pas valeur de démonstration absolue.

Finalement, nous présentons Figure III.21 les résultats de notre méthodologie de fusion, en considérant un niveau de bruit de 5% sur les données géophysiques, ainsi qu'une masse de croyance intrasonde de  $M(0) = 0.99$  et une valeur de  $k = 0.5$ . Le niveau de bruit et la valeur de  $k$  sont intermédiaires aux deux valeurs retenues Figures III.19 et III.20. Les résultats sont ici proposés pour une fusion opérée sous l'hypothèse d'un monde ouvert de Smets (Figure III.21.i), avec la règle de combinaison de Dempster-Shafer (Figure III.21.ii) et avec la règle de combinaison de PCR6 (Figure III.21.iii).

Ces résultats mettent en avant la capacité de notre méthodologie de fusion à caractériser les matériaux véritablement présents (Figure III.1) malgré une information géophysique bruitée, incapable de distinguer les matériaux correspondant aux hypothèses  $\theta_2$  et  $\theta_3$ . La confiance associée aux résultats proposés est plus importante à proximité des sondages et plus faible au-delà de la profondeur d'enfoncement (14 m).

Une zone semble grandement conflictuelle (Figure III.21.i.a). Elle s'étend sur la quasi totalité de la longueur de la section et depuis la seconde interface jusqu'à environ 12 m de profondeur. Les normalisations de Dempster-Shafer et de PCR6 permettent de répartir cette masse conflictuelle et il s'avère que la redistribution de PCR6 (Figure III.21.ii.a) amène à des résultats plus proches de la réalité que ceux proposés par la normalisation de Dempster-Shafer (Figure III.21.iii.a). Quelques cellules restent associées à l'hypothèse d'un « matériau autre »,  $\theta_4$ , mais leurs masses associées sont faibles (Figures III.21.ii.b et iii.b) et suggèrent qu'elles doivent être considérées avec prudence.

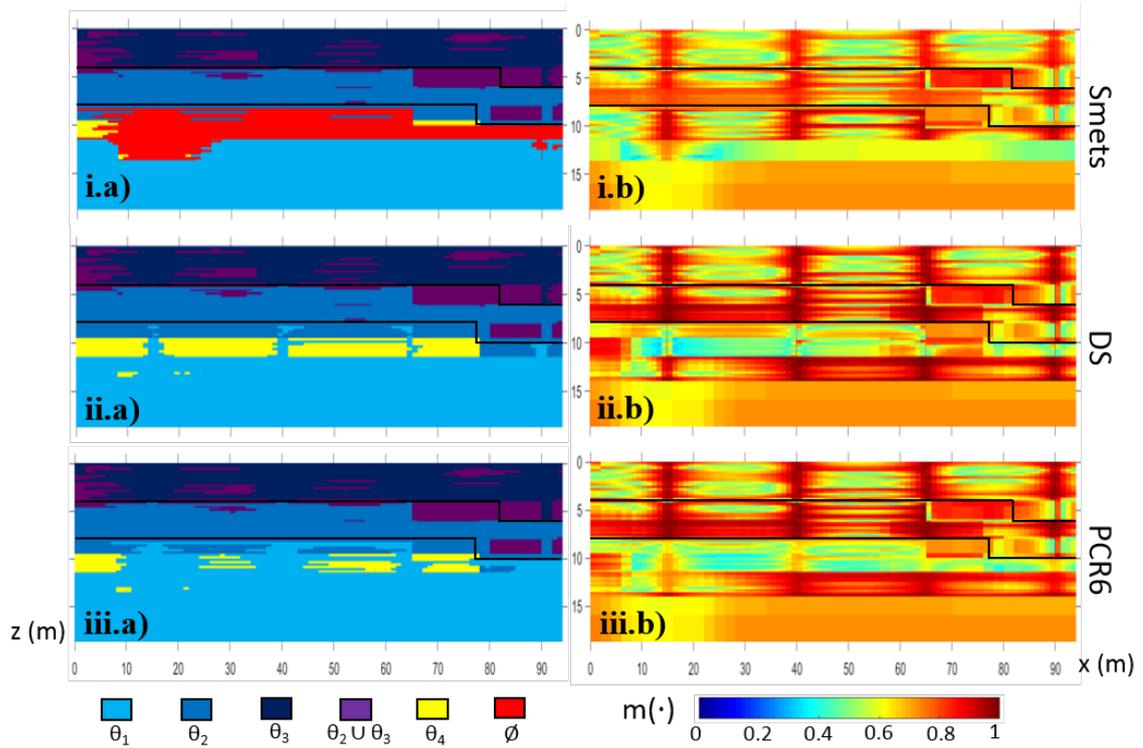


FIGURE III.21 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats de fusion avec i) hypothèse d’un monde ouvert de Smets, ii) règle de combinaison de Dempster-Shafer, iii) règle de combinaison de PCR6.

## 11 Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle de sous-sol considéré a été présenté. Il s’agit d’un modèle plus complexe que celui utilisé au Chapitre II puisqu’il s’agit d’un tricouche avec variation d’épaisseur des ensembles géologiques en bout de section.

Trois acquisitions de TRE ont pu être simulées avec différents niveaux de bruit afin d’obtenir trois sections de résistivités inversées distinctes. Le choix a été fait de proposer un modèle géoélectrique dans l’incapacité de distinguer les matériaux correspondants aux hypothèses  $\theta_2$  et  $\theta_3$  afin de vérifier si la méthodologie que nous proposons, à l’issue de la fusion, est capable de caractériser la section de sous-sol à l’aide d’informations géotechniques ponctuelles distinguant les trois ensembles.

Les résultats issus des 5 méthodes d’attribution de masses de croyance géophysiques, introduites au Chapitre II, ont été présentés et comparés. Suite à la discussion (cf. Section 5.6), il apparaît que la 4<sup>ème</sup> méthode d’attribution est la plus pertinente, quel que soit le niveau de bruit. Elle est donc retenue pour la suite de ce travail.

L’étude synthétique de résultats, obtenus avec différentes valeurs de paramètres (et pouvant être fixées à dires d’experts), pour l’attribution des masses de croyance

---

géotechniques, permet au lecteur de comprendre l'intérêt de ces paramètres d'entrée dans la mise en place de notre méthodologie de combinaison d'informations.

Ainsi, pour une méthode de reconnaissance jugée fiable par l'expert et à même de caractériser les matériaux investigués, des valeurs de masses de croyance intra-sondages  $M(0)$ , associées à l'hypothèse caractérisée par la méthode géotechnique, pourront être grandes. Pour un environnement de sous-sol fortement variable, indépendamment de la méthode géotechnique employée, des valeurs de  $k$ , importantes seront à privilégier.

A l'issue de la fusion, l'exemple de sous-sol retenu a permis de mettre en avant la capacité de notre méthodologie à fonctionner avec une hypothèse supplémentaire (FoD constitué de 4 hypothèses contre 3 au Chapitre II) ainsi que de travailler avec des masses de croyance non bayésiennes, en allouant de la masse sur une hypothèse incertaine ( $\theta_2 \cup \theta_3$ ) pour la partie géophysique. L'exemple choisi a également permis de mettre en avant la capacité de la méthodologie à faire face à une variation d'épaisseur des matériaux, grâce à une information géotechnique beaucoup plus prudente au niveau des interfaces et là où les informations proposées par deux sondages voisins diffèrent (pour une profondeur donnée). Les résultats ont également mis en évidence la capacité de la méthodologie à proposer des résultats intéressants pour différents niveaux de bruit.

Une prudence supplémentaire pourrait être prise concernant la décroissance latérale de l'information géotechnique. Le calcul du coefficient de variation, impactant la vitesse de décroissance latérale de la confiance associée à l'information géotechnique, pourrait en effet, prendre en considération plus de 3 mailles dans le sondage voisin.

Après avoir détaillé la méthodologie de combinaison d'informations géophysiques et géotechniques développée, nous venons d'illustrer son utilisation à partir d'un exemple de sous-sol plus complexe, sous la forme d'études synthétiques, en nous attardant sur les intérêts de chaque méthode d'attribution de masses de croyance. Nous rappelons cependant qu'un seul exemple ne peut être représentatif de la multitude des sous-sols pouvant exister et que l'objectif était ici d'illustrer et de comprendre certaines propriétés fondamentales de la méthodologie. La méthodologie n'a à présent été appliquée qu'à partir de jeux de données simulées. Il s'agira, dans le prochain chapitre, de considérer la création d'un banc d'essai en laboratoire afin de réaliser de véritables acquisitions physiques et de tester la validité de notre méthodologie sur un modèle expérimental contrôlé.

---

## Chapitre IV

### Fusion d'informations acquises sur un banc d'essai expérimental

---

Après avoir comparé les résultats obtenus en considérant différentes méthodes d'attribution de masses de croyance géophysiques et différentes valeurs de paramètres d'entrée pour l'attribution des masses de croyance géotechniques, ce quatrième chapitre présente la mise en place et le traitement de données sur un banc d'essai expérimental. Il s'agit de voir dans quelle mesure les résultats obtenus à l'issue de la fusion sont en adéquation avec la réalité du modèle constitué. La sélection et caractérisation des matériaux ainsi que la mise en place du modèle expérimental en vue d'acquérir des jeux de données réelles sont présentées dans la **Partie A**. Ce travail a nécessité l'encadrement de **Quiterie Forquenot de la Fortelle** qui a participé à la mise en place du banc d'essai et à la réalisation des acquisitions dans le cadre de son stage de fin d'étude aux MINES ParisTech. La **Partie B** présente l'application de la méthodologie de fusion à partir de ces jeux de données, afin de vérifier sa validité. Les résultats sont détaillés et comparés pour différentes positions et nombre de sondages simulés. Ces travaux sur banc d'essai ont été présentés dans le cadre du colloque francophone Dignes 2019 (Dezert et al., 2019d) ainsi que dans le cadre d'un article de revue publié en 2019 (Dezert et al., 2019b).

---

# Chapitre 4

---

<b>A</b>	<b>Mise en place d'un banc d'essai expérimental</b>	148
1	Introduction	148
2	Méthodes d'acquisition	148
2.1	Mini-dispositif de tomographie de résistivité électrique	149
2.2	Cône de pénétration de laboratoire	150
3	Cahier des charges pour la sélection de matériaux constitutifs du banc d'essai	151
4	Matériaux retenus et modèle proposé	152
4.1	Matériaux retenus	152
4.2	Modèle proposé	154
5	Mise en place du modèle	155
6	Conclusion	157
<b>B</b>	<b>Fusion de données acquises sur banc d'essai</b>	158
1	Introduction	158
2	Cadre de discernement	158
3	Traitement de l'information géophysique	159
3.1	Résultats de l'acquisition géoélectrique et de l'inversion	159
3.2	Caractérisation du cadre de discernement	161
3.3	Attribution des masses de croyance	161
4	Méthode géotechnique	162
4.1	Caractérisation du cadre de discernement	162
4.2	Simulation d'acquisition	163
4.3	Attribution des masses de croyance	163
4.4	Discussion	167
5	Résultats de fusion et discussion	168
5.1	Les différentes règles de combinaison	170
5.2	Influence du nombre et de la position des sondages	171
5.3	Considérations importantes et potentiel d'application	172
6	Conclusion	173

---

# Partie A

## Mise en place d'un banc d'essai expérimental

### 1 Introduction

Nous souhaitons mettre en place un banc d'essai expérimental afin de pouvoir acquérir de véritables jeux de données physiques qui pourront ensuite être employées, dans le but de tester la validité de la méthodologie de combinaison que nous proposons. Il s'agit donc d'être en capacité de constituer un banc d'essai contrôlé, dont les propriétés physiques individuelles des matériaux le composant sont connues. Cette constitution d'un banc d'essai correspond à une étape intermédiaire entre les études synthétiques précédemment présentées (Chapitre II et III) et les essais en grandeur réelle à venir (Chapitre V).

Il s'agira de voir, à l'issue du processus de fusion, dans quelle mesure les résultats que nous proposons sont en adéquation avec la réalité du modèle constitué. Il est important de saisir que le banc d'essai à mettre en place n'a pas vocation à être représentatif d'un véritable ouvrage hydraulique. En effet, il ne s'agit pas de reproduire une digue à échelle réduite, ainsi les matériaux peuvent ne pas être ceux entrant classiquement dans la constitution d'une digue de protection fluviale.

Dans cette première partie, nous présentons les méthodes et dispositifs d'acquisition qui seront considérés dans le cadre de cette étude expérimentale. Nous avons retenu la méthode de **tomographie de résistivité électrique** (TRE) en ce qui concerne la part géophysique de l'information, en cohérence avec les travaux proposés dans les précédents chapitres de ce manuscrit. La méthode du **mini cône de pénétration de laboratoire** a quant à elle été retenue pour la part géotechnique de l'information.

Nous détaillons ensuite le cahier des charges fixé, qui formalise les besoins permettant de guider le choix des matériaux constitutifs du banc d'essai. Les matériaux retenus, en accord avec le cadre établi par le cahier des charges, sont alors présentés avec leurs valeurs physiques caractéristiques. Nous présentons enfin le modèle de banc d'essai proposé ainsi que sa mise en place concrète.

### 2 Méthodes d'acquisition

Les méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques retenues pour la caractérisation du banc d'essai expérimental à mettre en place sont présentées ci-dessous.

## 2.1 Mini-dispositif de tomographie de résistivité électrique

Concernant la part géophysique de l'investigation, nous faisons le choix d'opter pour la méthode de TRE. Ce choix est motivé par deux raisons principales : i) la pertinence de la méthode dans l'application aux digues (Dezert et al., 2019a) et ii) la continuité avec les précédents travaux de ce travail de recherche (cf. Chapitre II).

Le dispositif d'électrodes classiquement utilisé pour les campagnes sur site n'est malheureusement pas adapté à une tomographie sur banc d'essai à échelle réduite (dimensions pluri-décimétriques). Nous proposons donc l'utilisation d'un dispositif miniaturisé d'électrodes (Figure IV.1), réalisé par Gautier Gugole, technicien au laboratoire GeoEND. Ce dispositif est composé de 48 électrodes alignées de 6 mm de long, 0.9 mm de diamètre, disposées à intervalles réguliers d'un centimètre. Il peut être déplacé le long du banc d'essai afin de réaliser plusieurs acquisitions et de couvrir une section plus grande (technique dite du « **roll-along** »).

Les différents matériaux, potentiellement constitutifs du banc d'essai, doivent être caractérisés électriquement en amont de leur mise en place (cf. cahier des charges, Section A.3.). Il s'agit de vérifier l'homogénéité électrique des matériaux ainsi que de connaître leurs gammes de résistivités associées. Cette caractérisation ne se fait pas sous la forme de tomographie mais en utilisant une plaque en PVC constituée d'électrodes de 2 mm de diamètre (Figure IV.2.a) avec pointe apparente d'un côté et tête plate de l'autre. Les injections de courant et mesures de potentiels se font via l'une ou l'autre des parties de la tige en fonction du matériau à caractériser et de sa capacité ou non à être pénétré par la pointe. Douze électrodes ont été fixées de sorte à pouvoir considérer différentes configurations d'électrodes (deux configurations Wenner et deux configurations rectangulaires), renseignant sur une anisotropie éventuelle du matériau caractérisé.

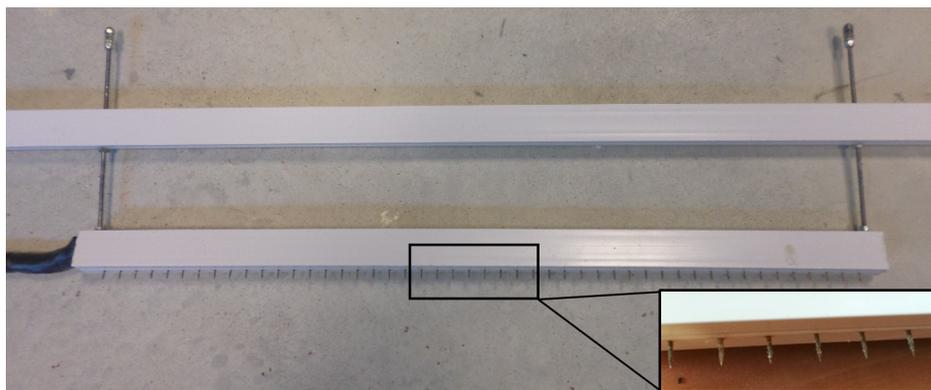


FIGURE IV.1 – Mini dispositif de TRE à 48 électrodes espacées de 1 cm, à hauteur réglable, utilisé pour l'acquisition géoélectrique sur le banc d'essai.

Pour les matériaux non pénétrables et ne pouvant être caractérisés par les pointes décrites plus haut, un dispositif d'électrodes creuses peut être employé (Figure IV.2.b). Il s'agit d'un dispositif développé initialement pour la caractérisation des bétons (Du Plooy et al, 2013) composé de 14 électrodes de 4 mm de diamètre, inter

espacées de 2 cm et dans lesquelles il est possible d'insérer des éponges humidifiées. Les acquisitions se font également dans une configuration Wenner (en considérant quatre électrodes inter espacées de 6 cm pour notre travail de caractérisation).

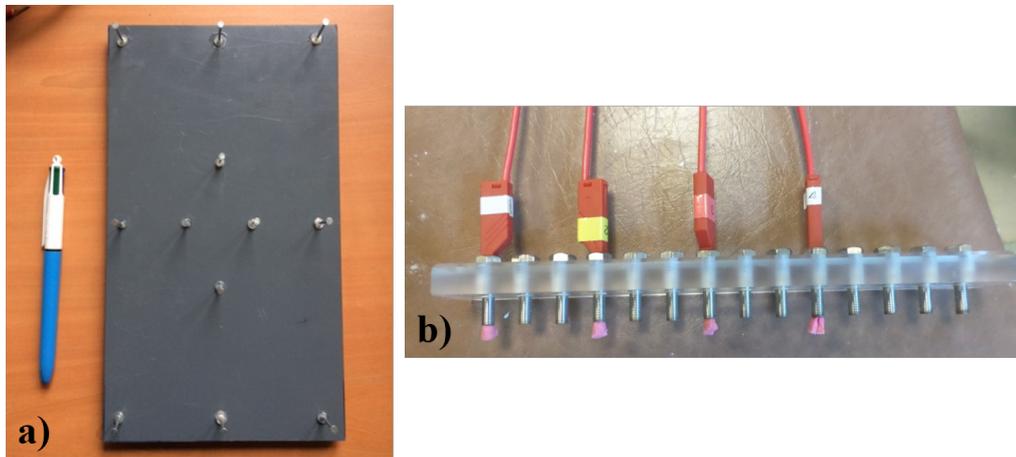


FIGURE IV.2 – a) Mini dispositif d'électrodes pour caractérisation de matériaux non cohésifs, b) mini dispositif d'électrodes creuses pour caractérisation de matériaux non pénétrables.

## 2.2 Cône de pénétration de laboratoire

En ce qui concerne la part géotechnique de l'investigation, nous optons pour la méthode du cône de pénétration de laboratoire (Figure IV.3). L'essai de pénétration réalisé à l'aide de cette méthode est décrit dans la norme NFP 94-052-1 (1995). L'essai consiste à i) disposer le matériau souhaité sur le socle de l'instrument, ii) placer la pointe du cône sur la surface plane du matériau, iii) libérer le cône et le laisser s'enfoncer durant 5 secondes. A l'issue de l'essai, l'opérateur peut relever une profondeur d'enfoncement (mm) associée au matériau.

La valeur de profondeur d'enfoncement mesurée à l'aide du cône de pénétration peut être comparée à la valeur de résistance de pointe (MPa) relevée au CPT lors d'essais sur site. En effet, bien que ces deux paramètres physiques soient distincts et que nous ne proposons pas de relation directe entre eux, ils sont tous deux reliés à l'état de cohésion du matériau.

L'inconvénient d'une telle méthode de caractérisation des matériaux est qu'elle n'est pas utilisable directement sur le banc d'essai expérimental. En effet, les matériaux peuvent uniquement être caractérisés en amont de leur mise en place et non pas in situ. En revanche, si l'essai au cône est répété sur un même matériau, il est possible d'obtenir une valeur moyenne ainsi qu'un écart-type de profondeur d'enfoncement, associés à chaque matériau. Ces valeurs nous permettront alors de réaliser des tirages aléatoires de valeurs de profondeurs d'enfoncement, en suivant une loi normale (tels que réalisés à partir de valeurs fictives aux Chapitres II et III), afin de simuler des sondages au sein du banc d'essai. L'avantage est alors double :

i) possibilité de simuler autant de sondages que souhaités, à différentes positions du banc d'essai sans l'endommager, ii) possibilité de continuer à simuler des essais aussi longtemps que souhaité suite à la destruction du modèle expérimental.



FIGURE IV.3 – Cône de pénétration de laboratoire.

### 3 Cahier des charges pour la sélection de matériaux constitutifs du banc d'essai

Afin de mettre en place le banc d'essai souhaité, une sélection des matériaux constitutifs est nécessaire. Il est important de rappeler ici que le banc d'essai désiré n'a pas vocation à être une représentation à échelle réduite d'une digue de protection fluviale. Cette sélection de matériaux passe par une caractérisation en résistivité électrique ( $\Omega.m$ ) et de profondeur d'enfoncement (mm) par les méthodes d'acquisition présentées plus haut.

Un cahier des charges a été établi, en amont de la sélection des matériaux, afin de pouvoir s'orienter vers un modèle expérimental pertinent, aussi bien en matière de faisabilité qu'en matière de résultats scientifiques attendus. Les exigences regroupées dans ce cahier des charges sont présentées ci-dessous :

- Nous souhaitons utiliser des matériaux associés à des **gammes de valeurs distinctes** pour chaque paramètre physique considéré (i.e. résistivité et profondeur d'enfoncement). Cette exigence est formulée afin d'éviter tout recoupement éventuel de valeurs et donc les cas les plus complexes.

- En lien avec la contrainte précédente, l'interaction entre les matériaux retenus doit être limitée, une fois ces derniers mis en place. A défaut, l'impact d'une telle

interaction sur les valeurs physiques mesurées doit être connue et négligeable (caractérisation en amont).

- Les matériaux retenus doivent pouvoir être considérés comme isotropes et homogènes dans l'espace à l'échelle de leur caractérisation individuelle géophysique et géotechnique pour éviter toute perturbation non contrôlée, ainsi que les variations des propriétés physiques étudiées.

- Nous souhaitons pouvoir retenir deux ou trois matériaux afin d'avoir une ou deux interfaces à caractériser. Il serait également souhaitable d'être en capacité de faire varier l'épaisseur d'un des matériaux (« anomalie » à caractériser à l'issue de la fusion).

- Le mini dispositif de TRE (Figure IV.1) doit pouvoir être placé sur le matériau qui sera en surface de modèle. Cela implique donc un matériau suffisamment cohésif en surface mais présentant également une résistance de contact correcte.

- Les matériaux doivent pouvoir être mis en place dans une cuve PVC à notre disposition et permettre une mise en œuvre facilitant le contrôle de la géométrie des couches.

Suite à la formulation d'un tel cahier des charges, les matériaux suivants ont été caractérisés au cône de pénétration de laboratoire ainsi qu'à l'aide des dispositifs géo-électriques présentés : plâtre extra fin, sable d'Hostun sec et saturé en eau (mise en place suivant deux protocoles distincts) ainsi que deux argiles différentes (kaolinites).

*Note : Les caractérisations de l'ensemble de ces matériaux ne sont pas décrites dans ce manuscrit, elles ont été réalisées dans le cadre du stage de fin d'études de **Quiterie Forquenot de la Fortelle** et apparaissent dans son rapport de stage (Forquenot de la Fortelle, 2018).*

## 4 Matériaux retenus et modèle proposé

### 4.1 Matériaux retenus

Suite à la caractérisation en résistivité électrique et en profondeur d'enfoncement des différents matériaux testés, plusieurs ont pu être écartés :

- Les deux **argiles** considérées que nous avons à notre disposition ne peuvent être retenues car elles se présentent sous forme de pains. Ces pains sont difficiles à assembler pour pouvoir réaliser un banc complet tout en conservant une valeur de résistivité cohérente. En effet, l'interface entre les blocs accolés induit des effets (transitions hétérogènes, discontinuités) ne permettant plus de considérer l'ensemble du volume comme homogène et isotrope.

- La sable d'Hostun sec ne peut être utilisé car la résistance de contact entre ce matériau et nos différentes électrodes est beaucoup trop grande.

- Le sable d'Hostun saturé en eau, en considérant une mise en place initiale du sable puis l'ajout d'eau par infiltration par le bas, ne peut être retenu. Le protocole d'infiltration d'eau considéré prend un temps trop important et semble peu pratique pour une mise en place dans la grande cuve à disposition.

Les matériaux retenus sont donc le **plâtre** extra fin Axton <sup>1</sup> ainsi que le **sable d'Hostun saturé en eau** (Flavigny et al., 1990), en suivant un protocole de pluviation du sable dans un volume d'eau.

#### 4.1.1 Caractérisation électrique

Les résultats associés à la caractérisation électrique des deux matériaux retenus sont présentés Table IV.1 et attestent du fait que les deux matériaux présentent des gammes de résistivités électriques distinctes.

TABLE IV.1 – Résistivités électriques apparentes, assimilées à de véritables résistivités sous l'hypothèse d'un matériau homogène et isotrope dans le volume testé ( $\Omega.m$ ), des matériaux retenus pour la mise en place au sein du banc d'essai.

	Plâtre	Sable d'Hostun saturé
Moyenne	31.3	78.2
Ecart-type	3.2	11.2
Nombre de mesures	12	52

En ce qui concerne la mise en place du sable d'Hostun, le matériau est pluvié avec soin, de manière homogène, dans un volume d'eau placé dans un bac (Figure IV.4.a). Après plusieurs essais, le ratio massique eau/sable retenu est d'environ 3.7/10. Les mesures ont été réalisées à l'aide du dispositif de pointes (Figure IV.2.a), à partir des différentes configurations d'électrodes possibles et en effectuant les mesures sur trois mélanges, dans trois bacs distincts, amenant le nombre de mesures à 52. L'écart-type observé entre les valeurs de résistivités obtenues, pour différentes configurations d'électrodes, mais pour un même mélange, est plus faible que l'écart-type observé entre les résistivités issues de l'acquisition sur deux bacs différents, mais pour une même configuration d'électrodes. Cela signifie qu'une fois mis en place, le matériau possède des propriétés électriques équivalentes dans les différentes directions de l'espace, en revanche, des variations dans la manipulation, imputables à l'opérateur, peuvent induire de légères variations d'un bac à l'autre, n'assurant pas des valeurs identiques de résistivités électriques.

1. Fiche technique : <https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/platre-fin-axton-5-kg-e120244>

Les valeurs de résistivités associées au plâtre correspondent à des gammes distinctes de celles associées au sable d'Hostun saturé. La plâtre a été caractérisé (Figure IV.4.b) à l'aide des électrodes creuses (Figure IV.2.b), à partir de deux plâtres distincts et pour 12 mesures réalisées. L'écart type associé à ces valeurs est particulièrement faible, respectant l'hypothèse de matériau isotrope ainsi que démontrant la bonne reproductibilité du protocole de mise en place, en considérant un ratio massique eau/plâtre de 1/2. La résistivité augmente en fonction du temps de prise du plâtre, mais cette augmentation est lente devant le temps de mise en place d'un banc d'essai et la réalisation des acquisitions géoélectriques. Dans l'éventualité de l'utilisation du plâtre avec un matériau saturé en eau dans la constitution du banc d'essai, des essais sur plâtre après prise, avant mise en eau et après mise en eau sont réalisés. Ils montrent que l'interaction du plâtre avec l'eau, sur un temps court, a un impact négligeable sur la résistivité électrique du matériau (diminution de  $5 \Omega.m$  après 1 heure d'interaction avec l'eau). L'avantage de ce matériau est que sa mise en place est facilement contrôlable étant donné qu'il se fige.

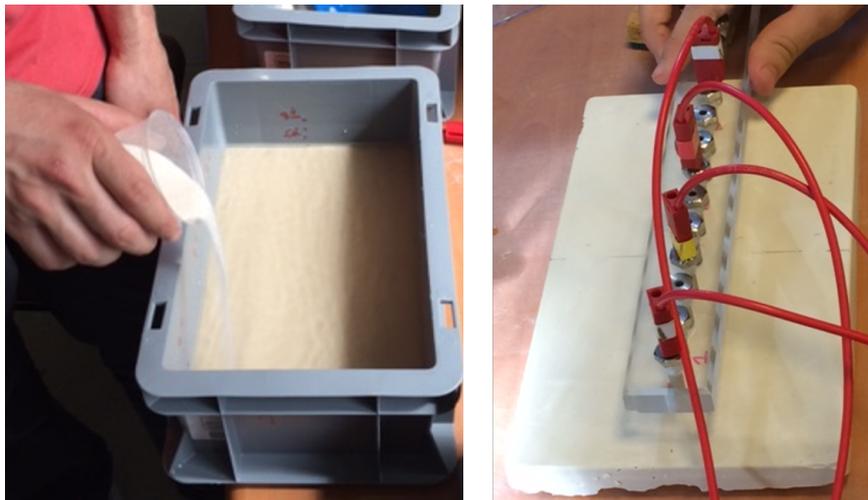


FIGURE IV.4 – a) Pluviation de sable d'Hostun dans un volume d'eau, b) caractérisation électrique du plâtre.

#### 4.1.2 Caractérisation au cône de pénétration de laboratoire

Les résultats associés à la caractérisation en profondeur d'enfoncement des deux matériaux retenus sont présentés Table IV.2 et attestent du fait que les deux matériaux présentent des gammes distinctes. Ces valeurs pourront être reprises pour la simulation de sondages et le tirage aléatoire de valeurs.

### 4.2 Modèle proposé

Après avoir retenu les deux matériaux que sont le plâtre et le sable d'Hostun saturé en eau, nous proposons la mise en place du banc d'essai présenté Figure IV.5.

TABLE IV.2 – Valeurs de profondeurs d'enfoncement (mm) des matériaux, caractérisés au cône de pénétration de laboratoire, retenus pour la mise en place au sein du banc d'essai.

	Plâtre	Sable d'Hostun saturés
Moyenne	0.11	17.31
Ecart-type	0.04	1.61
Nombre de mesures	8	10

Le banc d'essai doit être constitué au sein d'une cuve en PVC de dimensions  $100 \times 30 \times 17 \text{ cm}^3$  en ne considérant aucune variation transversale dans la mise en place des matériaux, en vue de réaliser une acquisition TRE longitudinale dans l'axe du modèle. Le banc d'essai doit être constitué de deux blocs de plâtre de 5 cm d'épaisseur, en bas de cuve, en prenant soin de laisser un espace libre de plâtre sur 20 cm qui doit constituer l'anomalie d'épaisseur à caractériser (longueur de 20 cm fixée arbitrairement). Après la prise du plâtre, l'eau doit être versée dans la cuve et le sable doit y être pluvié afin d'obtenir un sable saturé sur 2.5 cm au-dessus du plâtre et sur 7.5 cm d'épaisseur là où le plâtre est absent.

Le PVC de la cuve étant un matériau électriquement isolant et mécaniquement résistant, il pourrait jouer le rôle d'un troisième matériau (extrêmement résistif et résistant à l'enfoncement, et donc bien distinct des deux autres matériaux réels) à caractériser à l'issue de la méthodologie de combinaison de l'information (cf. Chapitre IV, Partie B.). La prise en compte de ce matériau pourrait en effet être à l'origine d'une interface franche à caractériser à 7.5 cm de profondeur.

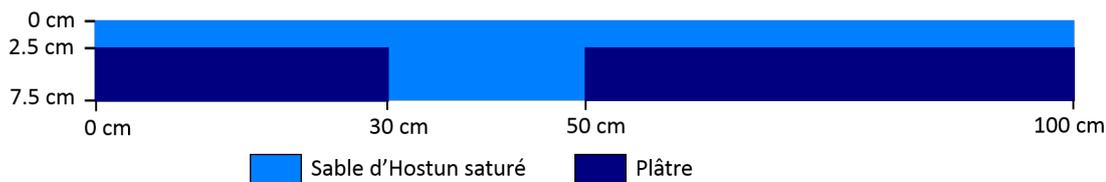


FIGURE IV.5 – Schéma en coupe longitudinale du banc d'essai expérimental à mettre en place.

## 5 Mise en place du modèle

Afin de mettre en œuvre le banc d'essai en suivant le schéma proposé Figure IV.5, le plâtre est d'abord réalisé à partir d'un mélange manuel de 16 kg de plâtre pour 8 kg d'eau. Ce mélange est ensuite mis en place en réalisant un coffrage (Figure IV.6.a). Un temps de prise du plâtre de 69 h est retenu afin d'obtenir un matériau de résistivité semblable aux résistivités mesurées préalablement lors de la phase de caractérisation électrique des matériaux.

Afin de vérifier les valeurs de résistivités électriques, des acquisitions sont réalisées sur le plâtre (Figure IV.6.b) avant la mise en place du sable saturé (ajout d'eau et pluviation du sable). La tomographie peut alors être effectuée (Figure IV.6.c). Enfin, après acquisition géoélectrique sur le modèle complet, le sable est retiré afin de pouvoir mesurer une dernière fois la résistivité électrique du plâtre seul (Figure IV.6.d), permettant de vérifier que l'eau a eu un impact négligeable sur ses caractéristiques électriques pendant la durée de l'acquisition sur le banc.

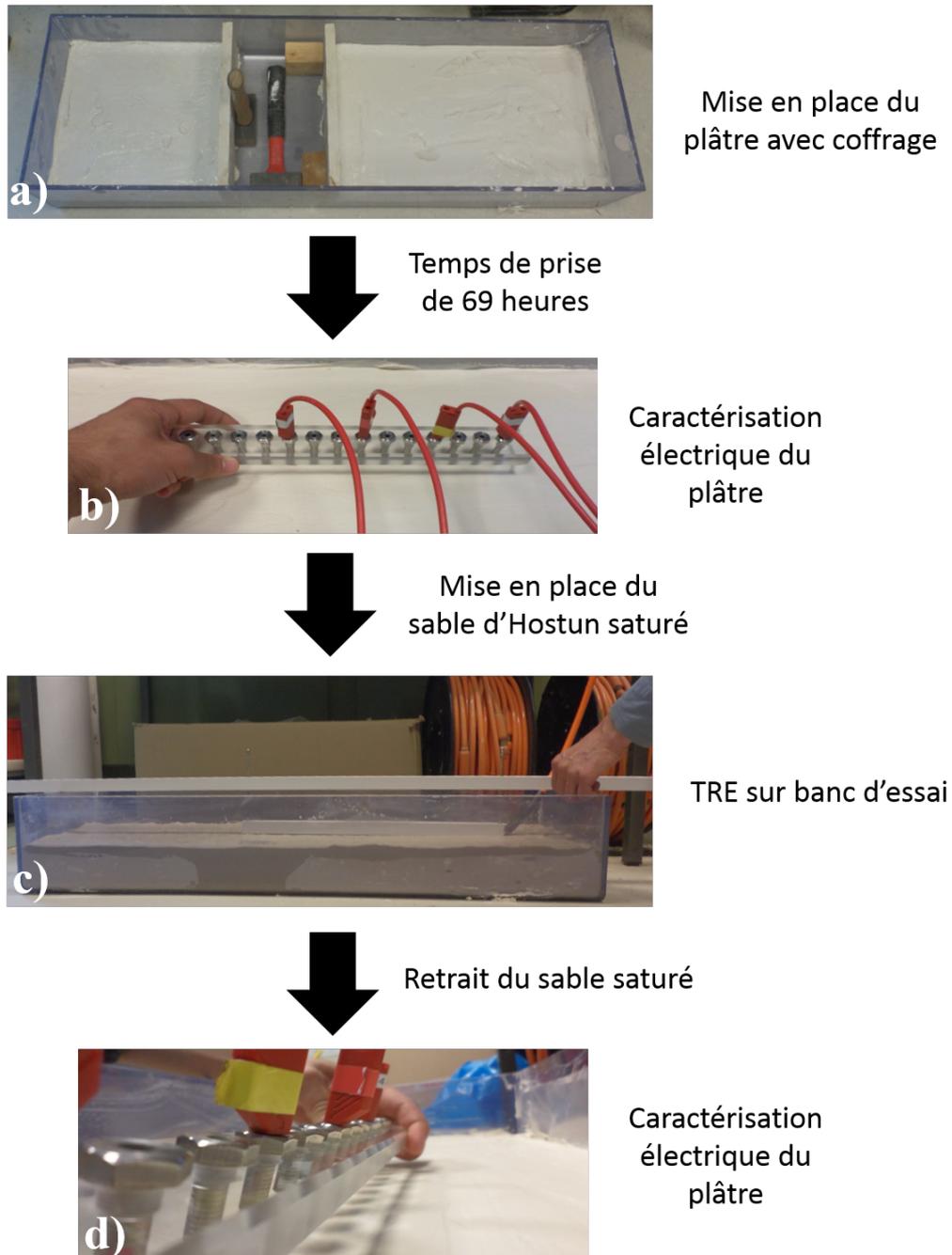


FIGURE IV.6 – Mise en place du banc d'essai expérimental et caractérisation électrique du plâtre a priori (b) et a posteriori (d).

## 6 Conclusion

Dans cette première partie, nous considérons un banc d'essai à échelle réduite, étape intermédiaire entre nos études synthétiques (Chapitre II et III) et nos essais de validation in situ (Chapitre V). Afin de réaliser des acquisitions géophysiques et géotechniques, deux méthodes de reconnaissance ont été retenues. Il s'agit de la méthode de TRE pour la partie géophysique ainsi que de la méthode du cône de pénétration de laboratoire pour la partie géotechnique. Nous avons fait le choix de considérer une caractérisation en amont des matériaux au cône de pénétration plutôt que de réaliser les essais directement sur le banc d'essai. Ce choix est motivé par des raisons pratiques mais également afin de pouvoir simuler le nombre de sondages souhaités, aux endroits désirés, aussi longtemps que voulu après la destruction du banc d'essai.

Les méthodes de reconnaissance retenues ont permis de rédiger le contenu du cahier des charges concernant la sélection des matériaux à mettre en place dans le modèle final. En respectant les critères fixés, et après caractérisation de matériaux en résistivité électrique et en profondeur d'enfoncement, deux matériaux ont été retenus. Du plâtre et du sable d'Hostun saturé en eau sont donc mis en place dans une cuve PVC, avec une absence de plâtre sur 20 cm de long.

Le modèle final est donc constitué de deux matériaux. A l'issue de la méthodologie de fusion, il serait pertinent de caractériser une section tricouche avec un troisième matériau ultra résistif dont l'origine serait à imputer à l'isolant qu'est le PVC du fond de la cuve utilisée. Dans le cadre de la **Partie B**, nous nous attachons à utiliser notre méthodologie de fusion, afin de mettre en évidence sa capacité à caractériser le modèle mis en place et dont le protocole de conception vient d'être détaillé.

## Partie B

# Méthodologie de fusion appliquée aux données acquises sur banc d'essai

### 1 Introduction

Dans cette seconde partie, il s'agit de tester la méthodologie de fusion à partir des données acquises sur le banc d'essai expérimental mis en place, dont le protocole est décrit en **Partie A**. Le modèle réalisé étant connu et contraint, il s'agit d'être capable d'apprécier et de comparer les résultats obtenus pour différentes positions et quantités de sondages géotechniques simulés.

Pour ce faire, nous présentons la section de modèle que nous souhaitons être capables de caractériser ainsi que le cadre de discernement qui y est associé. Trois matériaux sont à identifier et des interfaces horizontales et verticales sont à caractériser à l'issue de la combinaison des informations géotechniques et géophysiques.

Les résultats de l'acquisition géoélectrique et de l'inversion sont présentés, ainsi que la répartition des masses de croyance attribuées aux différentes hypothèses de  $\Theta$ . Il en va de même pour la partie géotechnique de l'information pour laquelle les différentes répartitions de masses de croyance sont proposées en fonction de la position et du nombre de sondages considérés.

Enfin, les résultats issus de la fusion des informations des deux sources considérées sont présentés et discutés afin de mettre en avant les avantages et limites de l'utilisation de notre méthodologie dans le cadre de ce modèle expérimental. L'impact du nombre et des positions de sondages géotechniques est également discuté afin de comprendre à quel point le choix de positionnement d'un sondage peut impacter les résultats de fusion et donc la caractérisation d'un éventuel ouvrage hydraulique.

### 2 Cadre de discernement

Un cadre de discernement composé de quatre hypothèses est retenu, de sorte que :

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}. \quad (\text{IV.1})$$

Avec  $\theta_1$  correspondant au matériau plâtre,  $\theta_2$  au sable d'Hostun saturé en eau,  $\theta_3$  au PVC dur et électriquement isolant de la cuve, pouvant être assimilé à un socle géologique, et  $\theta_4$  correspondant à des matériaux autres que les trois venant d'être cités.

La figure IV.7 présente le modèle cible tel que nous souhaitons être en mesure de l'imager à l'issue de la fusion. Il s'agit d'une section idéalisée, représentée sous forme d'hypothèses constitutives du FoD en respectant la disposition nominale des matériaux mis en place au sein du banc d'essai (Figure IV.6).

Les dimensions de la section imagée ne correspondent pas aux dimensions du modèle mis en place. En effet, bien que la cuve utilisée fasse 1 mètre de long, l'acquisition géoélectrique ne couvre qu'une section de 83 cm de long et nous permet d'imager jusqu'à 18 cm de profondeur. Nous tirons donc profit de cette reconnaissance géoélectrique profonde pour associer le fond isolant à un troisième matériau ( $\theta_3$ ) à caractériser.

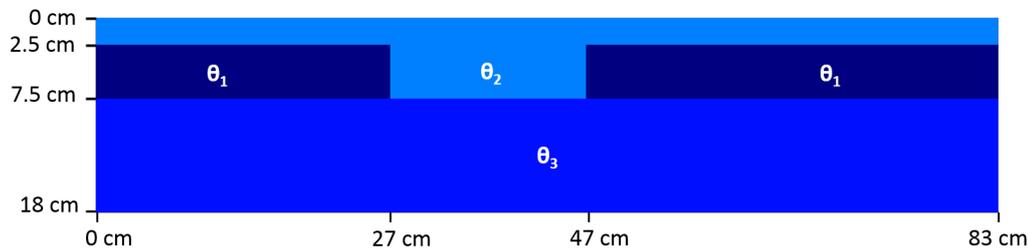


FIGURE IV.7 – Section idéalisée, représentative des hypothèses de  $\Theta$  associées aux matériaux constitutifs du banc d'essai.

### 3 Traitement de l'information géophysique

#### 3.1 Résultats de l'acquisition géoélectrique et de l'inversion

L'acquisition géoélectrique est faite sous forme de « roll-along » dans l'axe (longitudinal) du banc d'essai, en considérant une configuration Wenner. Cette technique consiste à déplacer le dispositif électrique, après une première acquisition réalisée à partir des 48 électrodes, afin d'acquérir des données supplémentaires en couvrant une longueur plus importante et en auscultant un volume plus grand que ce que permet un dispositif fixe. Le déplacement est ici de 12 cm et il est répété trois fois (quatre positions au total) de sorte à couvrir une longueur totale de 83 cm.

Les résistivités apparentes (Figure IV.8) mettent en avant une augmentation de la résistivité avec la profondeur ainsi que la présence d'une anomalie de résistivité en centre de modèle.

Les résultats issus de l'inversion sont présentés Figure IV.9 et mettent en évidence la présence de trois ensembles distincts situés à des positions relativement proches de celles du modèle cible (Figure IV.7). Un ensemble de résistivité intermédiaire est localisé en surface (à imputer au sable saturé), un ensemble de résistivité importante est situé à la base (à imputer à la cuve PVC) et un ensemble de résistivité plus faible se trouve sur les parties droite et gauche du modèle (à imputer au plâtre), entre les deux autres ensembles. Les interfaces horizontales et verticales sont cependant

mal localisées et ne sont pas franches, contrairement à la réalité, ce qui est dû au caractère intégrant des mesures géoélectriques, et au caractère lissant de la méthode d'inversion.

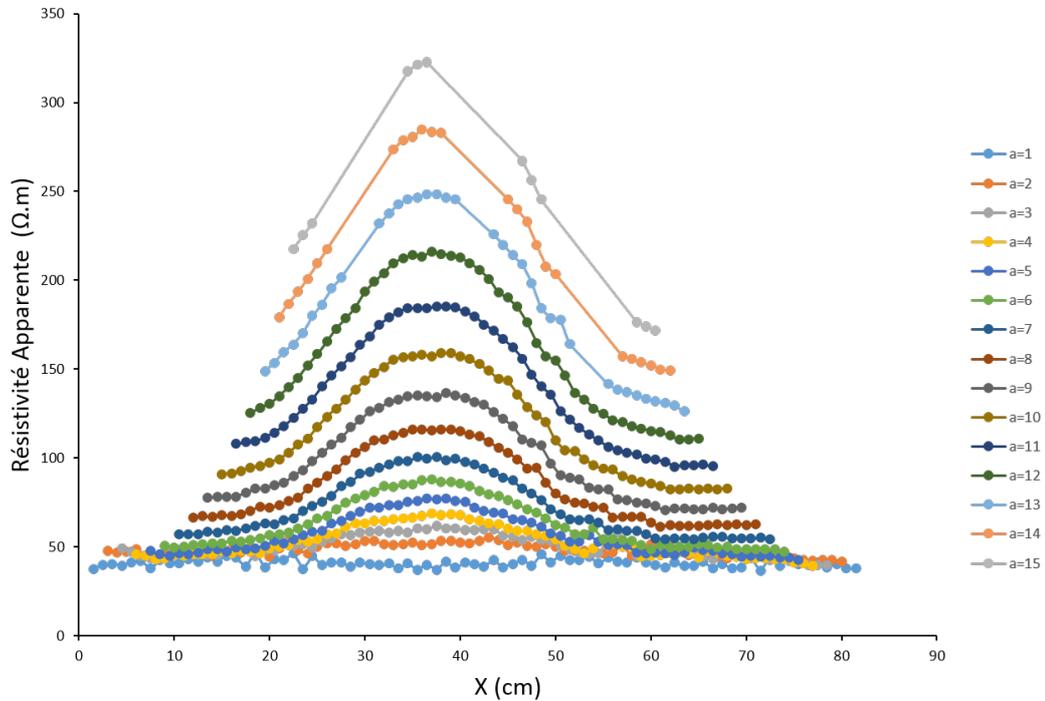


FIGURE IV.8 – Profils de résistivités apparentes en fonction de l'abscisse longitudinale  $X$  et de l'écartement inter-électrodes considéré ( $a$  en cm), en configuration Wenner.

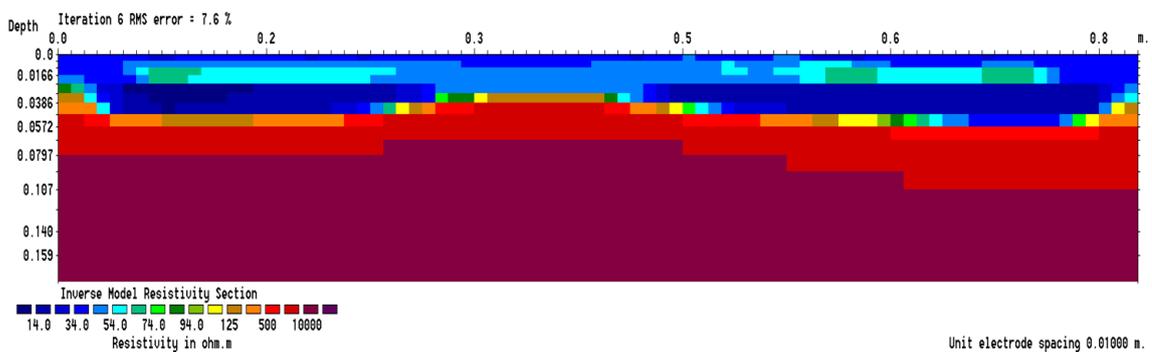


FIGURE IV.9 – Section de résistivités inversées (norme L1) après acquisition sur banc d'essai expérimental.

De plus, la variation d'épaisseur du sable d'Hostun saturé est mal évaluée. En effet, la zone d'épaisseur plus importante est détectée mais est associée, dans sa partie inférieure, à des valeurs de résistivités électriques bien supérieures à ce qu'elles ne sont en réalité. Ces résultats semblent indiquer qu'un matériau résistif remonte au

sein de la section alors qu'il s'agit en réalité d'un matériau de résistivité intermédiaire qui s'enfonce.

### 3.2 Caractérisation du cadre de discernement

Les valeurs de résistivités électriques issues de l'inversion ne correspondent pas exactement aux valeurs mesurées lors de la caractérisation individuelle des matériaux (Table IV.1). On s'inspire donc de la distribution des résistivités inversées sous forme de classes modales (Figure IV.10) afin de pouvoir fixer les bornes de valeurs à associer aux hypothèses de  $\Theta$ . Cette représentation permet de mettre en évidence les trois grands ensembles de matériaux du modèle. Ainsi, les bornes des classes de résistivités électriques ( $\Omega.m$ ) peuvent être fixées afin d'associer des intervalles de même longueur (en échelle logarithmique) aux hypothèses de  $\Theta$ , tel que :

- [10, 35] soit associée à l'hypothèse  $\theta_1$ ,
- [40, 140] soit associée à l'hypothèse  $\theta_2$ ,
- [9 500, 33 250] soit associée à l'hypothèse  $\theta_3$ ,
- [2.85, 10[ $\cup$ ]35, 40[ $\cup$ ]140, 9 500[ $\cup$ ]33 250, 116 375] soit associée à l'hypothèse  $\theta_4$ .

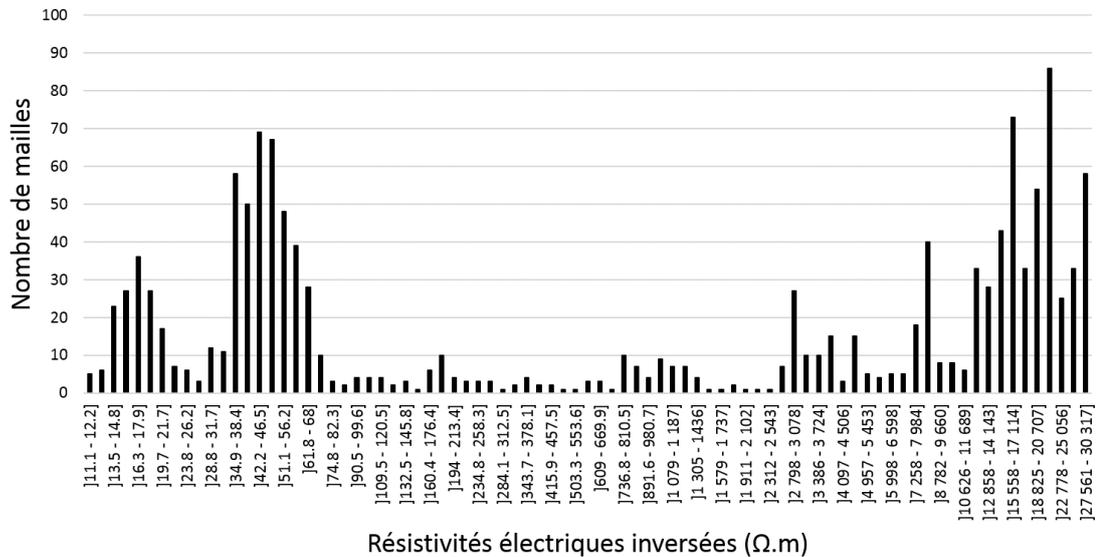


FIGURE IV.10 – Distribution sous forme de classes modales des valeurs de résistivités électriques issues de l'inversion, permettant de caractériser les valeurs des bornes des intervalles associés aux hypothèses de  $\Theta$ .

### 3.3 Attribution des masses de croyance

Les masses de croyances sont réparties sur les hypothèses de  $\Theta$  en utilisant la méthode n° 4 décrite au Chapitre II, Section.B.3.4.4. Les résultats d'une telle attribution sont présentés Figure IV.11 et suggèrent la présence de sable saturé sur environ 2 cm en surface, puis la présence de plâtre sur environ 2.5 cm, suivi du matériau résistif (cuve PVC) à partir de 7 à 10 cm de profondeur jusqu'à la base. Il

apparaît que l'interruption de la présence de plâtre entre  $x = 27$  et  $x = 47$  cm est bien caractérisée. Une proportion importante de matériau « autre » (hypothèse  $\theta_4$ ) est représentée, ce que l'on sait non représentatif de la réalité du modèle. Le plâtre n'est pas caractérisé jusqu'en bord de cuve et les profondeurs des interfaces sont incorrectes. La figure IV.11.b met en avant une confiance plus faible associée aux hypothèses présentées au niveau de la variation d'épaisseur de sable ainsi que dans la partie inférieure gauche de la section.

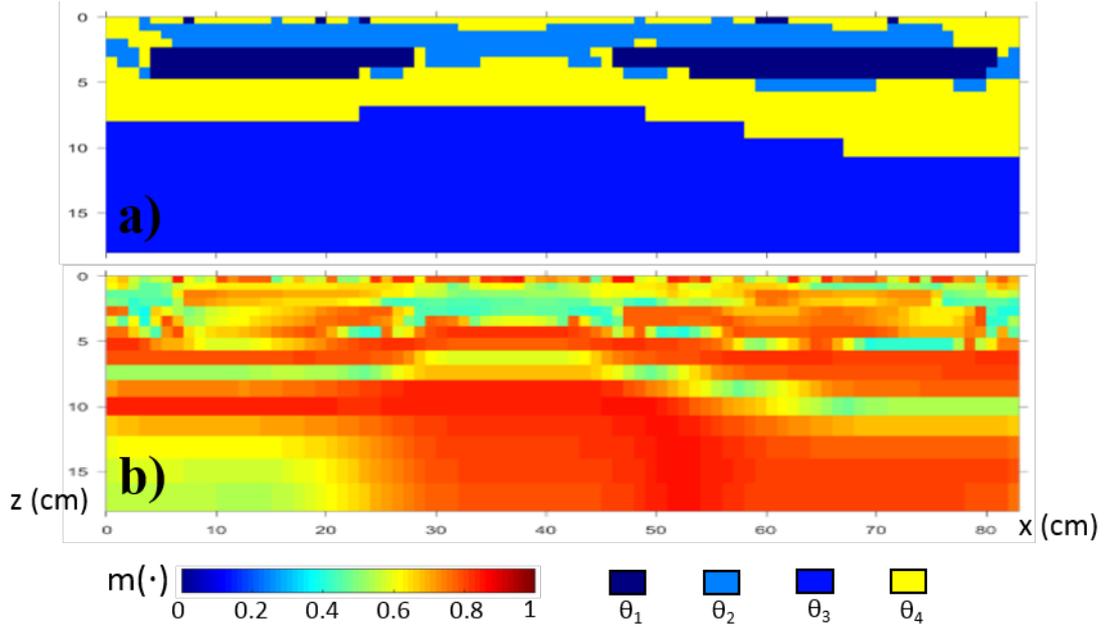


FIGURE IV.11 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée suite à l'attribution des masses de croyance géophysiques. b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a).

## 4 Méthode géotechnique

### 4.1 Caractérisation du cadre de discernement

Concernant la part géotechnique de l'information, les gammes de profondeur d'enfoncement associées aux hypothèses de  $\Theta$  sont directement issues de la caractérisation des matériaux au cône de pénétration en laboratoire (Table IV.2), en considérant les valeurs moyennes de profondeur d'enfoncement comme les valeurs centrales des classes. Puisque la pointe du cône ne peut pénétrer le PVC de la cuve, nous considérons une valeur moyenne de 0 mm pour le matériau « PVC » (hypothèse  $\theta_3$ ). Les classes de profondeur d'enfoncement (mm) associées aux hypothèses du FoD sont les suivantes :

- $[0.04, 0.19]$  associée à l'hypothèse  $\theta_1$ ,
- $[13, 21]$  associée à l'hypothèse  $\theta_2$ ,
- $[-0.02, 0.02]$  associée à l'hypothèse  $\theta_3$ ,
- $[-0.05, -0.02[ \cup ]0.02, 0.04[ \cup ]0.19, 13[ \cup ]21, 100]$  associée à l'hypothèse  $\theta_4$ .

Il est à noter que des valeurs de profondeur d'enfoncement négatives sont considérées pour la caractérisation du cadre de discernement. Ces valeurs négatives n'ont pas de réalité physique. Cependant, lors du tirage aléatoire de valeurs de profondeur d'enfoncement pour le matériau PVC, la valeur moyenne de profondeur d'enfoncement étant fixée à 0 mm, avec un écart type de 0.01 mm, des valeurs négatives peuvent être tirées. Le fait que ces valeurs soient négatives n'a cependant aucun impact sur la méthodologie utilisée et sur le calcul de  $C_v$  (Eq II.24).

## 4.2 Simulation d'acquisition

Comme expliqué dans la **Partie A**, les sondages sont simulés et non pas réalisés directement sur le banc d'essai. Ainsi, les essais simulés sont associés à une largeur de forage de 2 mm, avec acquisition du paramètre « profondeur d'enfoncement » tous les 5 mm jusqu'à 15 cm de profondeur et avec une imprécision sur la mesure de 0.01 mm. Les valeurs de profondeurs d'enfoncement, issues des tirages aléatoires réalisés en suivant une loi normale, peuvent ensuite être rattachées aux différents matériaux constitutifs du modèle.

Deux types de simulation de sondages peuvent donc exister en fonction de l'emplacement du sondage simulé au sein de la section. Ainsi, il existe i) des sondages de type Sd 1 (Figure IV.12) passant par les trois matériaux considérés (hypothèses  $\theta_2$ ,  $\theta_1$  puis  $\theta_3$ ) et dont les valeurs de profondeurs d'enfoncement appartiennent aux trois intervalles définis section 4.1 et ii) des sondages de type Sd 2 (Figure IV.12) ne passant pas par le plâtre (hypothèses  $\theta_2$  puis  $\theta_3$ ). Chaque sondage simulé connaît un tirage aléatoire de valeurs qui lui est propre de sorte à ne pas retrouver exactement les valeurs de profondeur d'enfoncement d'un sondage à l'autre.

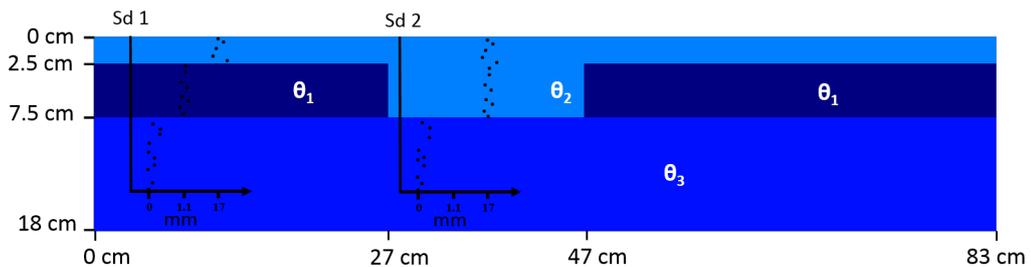


FIGURE IV.12 – Exemple des deux types de sondages Sd 1 et Sd 2 pouvant être simulés au sein du modèle.

## 4.3 Attribution des masses de croyance

Un des objectifs de cette étude sur banc d'essai expérimental est de comprendre et d'analyser l'impact que peut avoir différentes quantités et positions de sondages sur les résultats de fusion. Ainsi, nous considérons des cas d'étude à 2, 3, 5 et 8 sondages, avec ou sans la présence de sondages de type Sd 2. Pour ces exemples, nous fixons une masse de croyance intrasondage sur l'hypothèse caractérisée de  $M(0) = 0.99$ . Cette valeur proche de 1 est fixée afin de représenter le haut niveau de confiance

que nous attachons à la qualité de l'information issue de nos simulations. Le coefficient de décroissance latérale  $k$  est fixée à une valeur de  $k = 0.1$ . Cette valeur est volontairement faible puisque les matériaux ont été sélectionnés de sorte à ce qu'ils puissent être considérés comme homogènes dans l'espace, ils sont donc peu chahutés (faible variabilité spatiale des propriétés de ces matériaux). Cependant, dans le cas d'une simulation de 8 sondages, un exemple à partir d'une valeur de  $k = 0.5$  est également présenté à titre comparatif.

#### 4.3.1 Simulation de 2 sondages

Dans cet exemple, deux sondages de type Sd 1 sont simulés respectivement à  $x = 15$  et  $x = 65$  cm, i.e. de part et d'autre de la zone centrale où le plâtre est absent. Puisqu'aucun sondage de type Sd 2 n'est simulé, la variation d'épaisseur de sable saturé n'apparaît pas dans la représentation des hypothèses issue de la caractérisation géotechnique (Figure IV.13.a). L'épaisseur de sable saturé en surface est quant à elle bien caractérisée sur 2.5 cm avec un bon niveau de confiance associé (Figure IV.13.b), avec une masse supérieure à 0.7. Cette caractérisation sur toute la longueur, qui n'apparaît pas pour les deux autres hypothèses ( $\theta_1$  et  $\theta_3$ ), est à imputer au coefficient de variation entre les valeurs des deux sondages qui est plus faible pour le sable que pour les deux autres matériaux (lié à un écart-type associé plus faible). Aucun matériau n'est logiquement caractérisé au-delà des 15 cm d'investigation et les masses de croyance les plus grandes sont localisées à proximité des sondages.

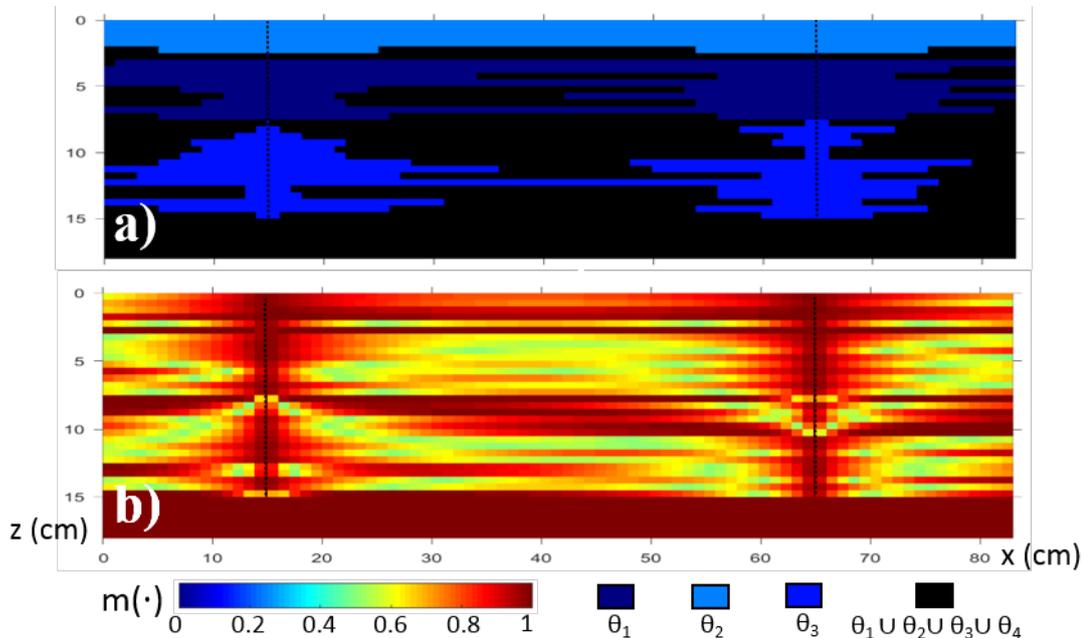


FIGURE IV.13 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques avec 2 sondages et  $k = 0.1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a).

### 4.3.2 Simulation de 3 sondages

La simulation d'un troisième sondage de type Sd 2 à  $x = 40$  cm fait décroître drastiquement la confiance associée à l'hypothèse  $\theta_1$  caractérisée par le premier et dernier sondage entre 2.5 et 7.5 cm de profondeur (Figure IV.14.b). En effet, le sondage central caractérise un matériau différent (le sable saturé) à ces profondeurs et impose une décroissance rapide de la confiance aux sondages voisins. L'hypothèse  $\theta_3$  est désormais mieux représentée au sein de la section avec ce sondage supplémentaire.

La représentation du matériau sable saturé ( $\theta_2$ ) est plus large autour du sondage de coordonnée  $x = 40$  cm entre 2.5 et 7.5 cm de profondeur, que celle du matériau plâtre ( $\theta_1$ ) à  $x = 15$  et  $x = 65$  cm. Cette différence n'est pas souhaitée et n'avait pas été envisagée. Elle s'explique par le fait qu'il y a un rapport très important (de l'ordre de 200) entre les valeurs de profondeurs d'enfoncement du plâtre et celles du sable saturé, impactant grandement sur la valeur du coefficient de variation et donc sur le taux de décroissance latérale de la confiance.

Cet exemple permet donc de mettre en évidence la limite de la méthode de calcul de  $C_v$  lorsque la différence d'ordre de grandeur entre deux intervalles d'un paramètre géotechnique est trop importante. Cet écart induit un déséquilibre relatif en ce qui concerne la représentation de l'information. Cette limite reste cependant modérée puisque la masse décroît de façon exponentielle et passe ici sous la barre des 50% de confiance à 5 cm du sondage.

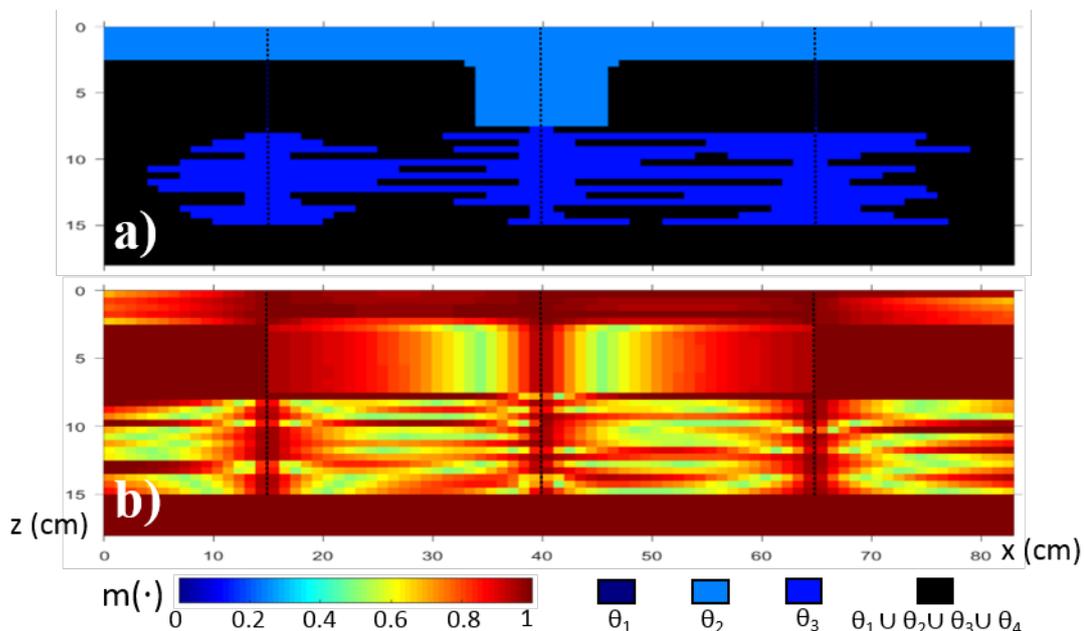


FIGURE IV.14 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques avec 3 sondages et  $k = 0.1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a).

### 4.3.3 Simulation de 5 sondages

Dans cet exemple, cinq sondages sont simulés (Figure IV.15), dont quatre de type Sd 1 ( $x = 4, 22, 58$  et  $76$  cm) et un de type Sd 2 ( $x = 40$  cm). Puisque l'information devient redondante entre les deux sondages à gauche et les deux sondages à droite, la section est très bien caractérisée avec simplement une incertitude complète entre 2.5 et 7.5 cm de profondeur là où l'information diffère entre les sondages de type Sd 1 et le sondage de type Sd 2. Les positions des interfaces verticales à  $x = 27$  et  $x = 47$  cm ne peuvent être définies.

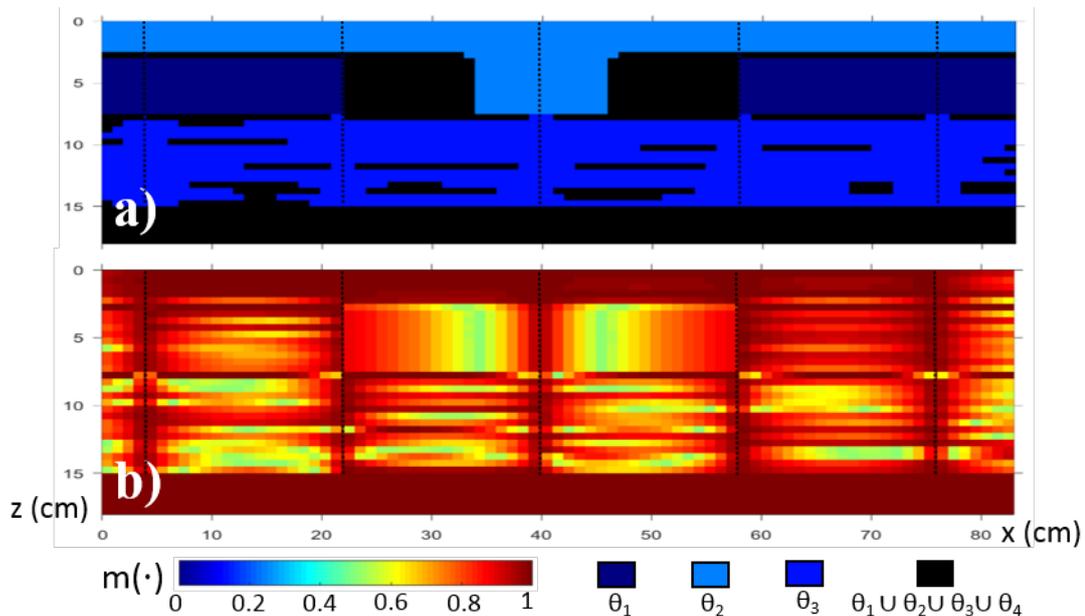


FIGURE IV.15 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l'attribution des masses de croyance géotechniques avec 5 sondages et  $k = 0.1$ . b) Représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a).

### 4.3.4 Simulation de 8 sondages

Dans cet exemple, huit sondages sont simulés, dont six sondages de type Sd 1 ( $x = 10, 20, 50, 60, 70$  et  $80$  cm) et deux sondages de type Sd 2 ( $x = 30$  et  $40$  cm). Avec une information aussi riche, la quasi-totalité de la section est correctement caractérisée avec une valeur de  $k = 0.1$  (Figure IV.16.i.a), hormis les positions exactes des interfaces verticales qui ne sont pas parfaitement établies.

Si le milieu investigué est soupçonné être plus hétérogène et qu'une valeur plus prudente de  $k = 0.5$  est retenue, les résultats associés sont présentés Figure IV.16.ii. Ils mettent en évidence une section moins bien caractérisée entre les sondages et une absence de caractérisation de l'« anomalie » pouvant être observée entre les sondages de type Sd 1 et Sd 2 pour  $k = 0.1$ .

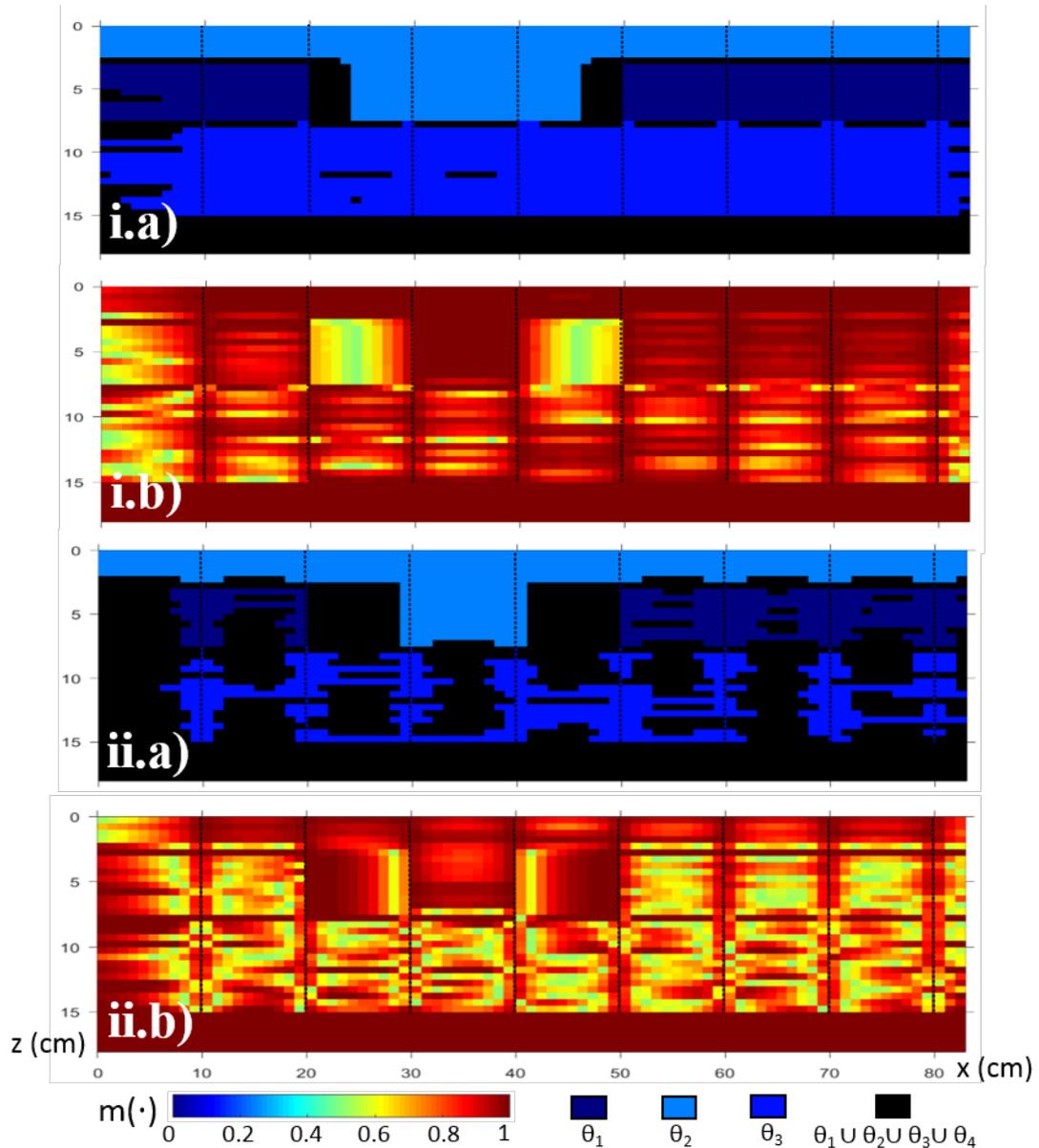


FIGURE IV.16 – a) Représentations des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée, suite à l’attribution des masses de croyance géotechniques avec 8 sondages. b) Représentations des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). i) Pour  $k = 0.1$ , ii) pour  $k = 0.5$ .

#### 4.4 Discussion

Les résultats d’attribution de masses de croyance pour la part géotechnique de l’information mettent en avant l’importance du positionnement des sondages, tout autant que leur quantité. Ainsi, la capacité de l’information géotechnique à caractériser la section de sous-sol est en partie fonction du taux de décroissance latérale de la confiance depuis les sondages. Ce taux de décroissance est à lier directement aux matériaux rencontrés à même profondeur, dans le sondage voisin.

Ces résultats font apparaître que le sable est mieux caractérisé que les deux autres matériaux présents au sein de la section d'étude. Cette bonne caractérisation est à imputer à des valeurs de profondeurs d'enfoncement moins dispersées pour ce matériau (faible écart-type par rapport à la valeur moyenne) que les valeurs des deux autres matériaux. Ce faible dispersion induit alors des valeurs de  $C_v$  plus faibles que celles des autres matériaux. Cet aspect est un des points forts de la méthode. En effet, elle prend en compte le fait que le matériau soit bien caractérisé en amont, en l'imputant sur le niveau de confiance associé.

Ces résultats mettent également en avant un inconvénient de la méthode utilisée. Effectivement, la Figure IV.14 fait ressortir une asymétrie de la décroissance lorsque les ordres de grandeurs des valeurs des classes géotechniques définies sont trop différents (entre 2.5 et 7.5 cm de profondeur) pour deux matériaux à même profondeur. L'écart entre ces ordres de grandeurs impacte directement la valeur de  $C_v$  (Eq II.24) et donc le taux de décroissance latérale. Dans les exemples présentés (Figure IV.13 à IV.16.ii), l'asymétrie est par ailleurs accentuée car une valeur de  $k$  faible a été fixée (hypothèse de matériaux très homogènes). En revanche, pour une valeur de  $k = 0.5$  (Figure IV.16.ii) le niveau d'asymétrie est nettement moins important et l'effet non désiré est presque entièrement corrigé. Le problème est ici rencontré à cause des matériaux que nous avons volontairement souhaité très distincts en matière de valeurs du paramètre géotechnique (cf. cahier des charges). Ce défaut n'avait auparavant pas été constaté sur les modèles numériques réalisés (Chapitres II et III) et il n'est pas non plus mis en évidence sur les résultats de l'étude du site de St Clément-des-Levées (Chapitre V).

Pour les paramètres géotechniques que nous retenons dans le cadre de ce travail de thèse, un tel contraste entre gammes de paramètres géotechniques n'est pas rencontré. Cette irrégularité n'est toutefois pas à ignorer. En effet, si l'on souhaite s'intéresser à des données pouvant s'exprimer sur des ordres de grandeurs très différents (ex : données de perméabilités) et dans le cas où des matériaux très distincts sont situés à même profondeur, il sera nécessaire de songer à mettre en place un coefficient de variation tenant compte de ces rapports entre classes, de sorte à les corriger.

## 5 Résultats de fusion et discussion

Les résultats issus de la fusion des informations géophysiques et géotechniques sont présentés Figure IV.17 pour une valeur de  $k = 0.1$  et pour 4 configurations différentes de sondages géotechniques (pour 2, 3, 5 et 8 sondages simulés). La Figure IV.18 représente les résultats de fusion pour une valeur de  $k = 0.5$  avec simulation de 8 sondages équidistants.

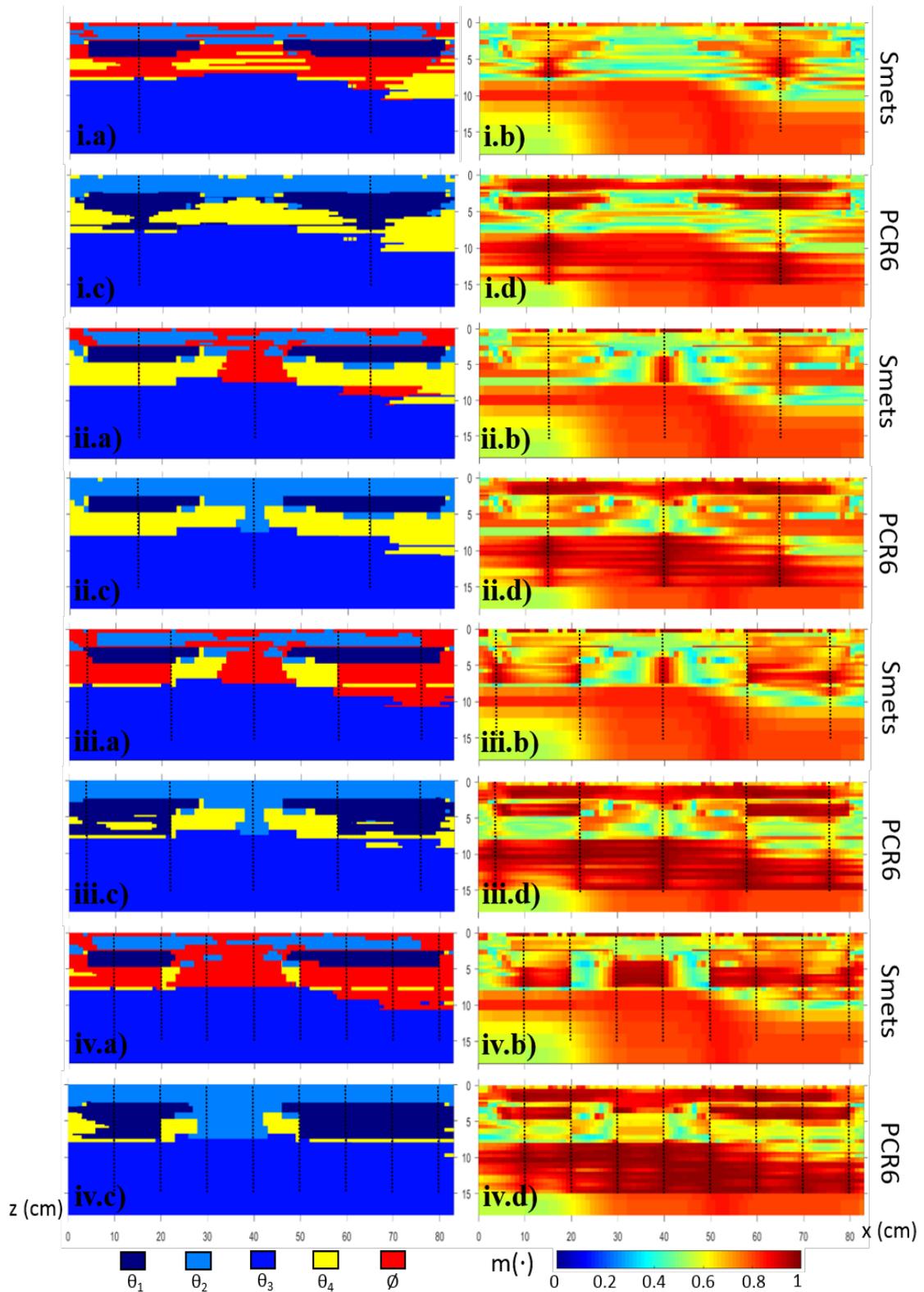


FIGURE IV.17 – Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance associée en a) et c) avec leurs valeurs de masses associées b) et d). Pour une simulation de i) 2 sondages, ii) 3 sondages, iii) 5 sondages et iv) 8 sondages. Pour chaque cas, les figures (a,b) sont obtenus avec combinaison de Smets et les figures (c,d) sont obtenus avec combinaison de PCR6.

Un exemple de résultats issus de l'utilisation de la règle de combinaison de DS est présenté Figure IV.18.ii. Ces résultats mettent en avant le fait que la règle de combinaison PCR6 permet une meilleure caractérisation de la section que la règle de DS (notamment entre 5 et 7.5 cm de profondeur). Ceci explique que nous ne présentons pas les résultats issus de la règle de DS pour les différentes configurations de sondages considérées Figure IV.17. L'ensemble de ces résultats sont décrits et discutés dans les sections suivantes.

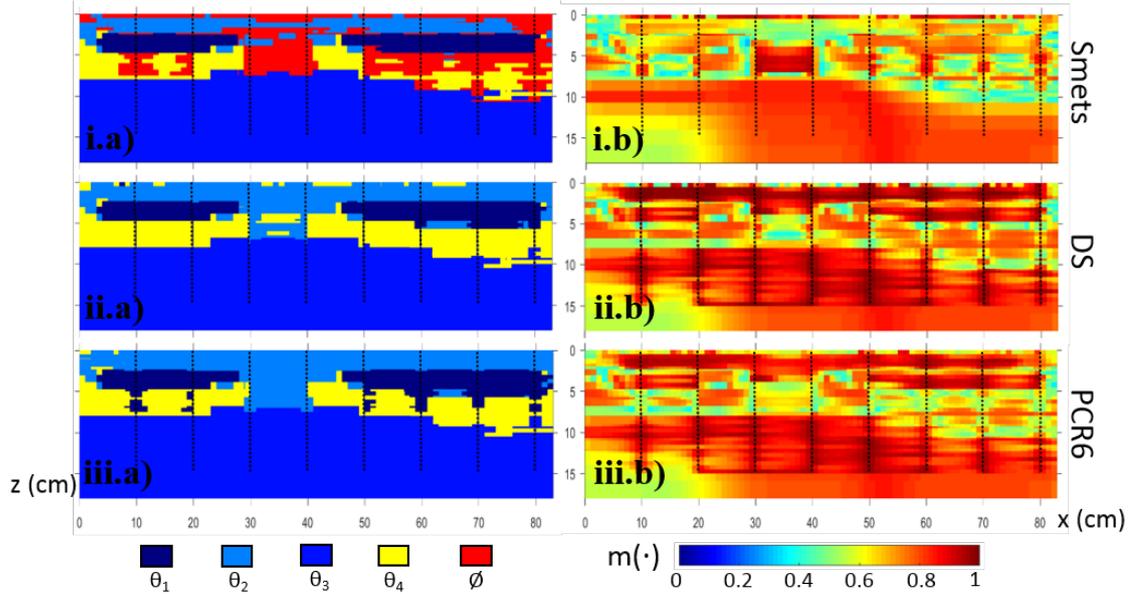


FIGURE IV.18 – a) Représentations des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance post-fusion, b) représentations des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats de fusion avec i) hypothèse d'un monde ouvert de Smets, ii) règle de combinaison de Dempster-Shafer, iii) règle de combinaison de PCR6.

### 5.1 Les différentes règles de combinaison

Les résultats obtenus par la règle de combinaison PCR6 dans le cadre d'une simulation de 8 sondages (Figure IV.17.iv.c) sont très proches du modèle visé (Figure IV.7). Les trois ensembles sont bien caractérisés et les interfaces à 2.5 cm de profondeur (sable-plâtre) et 7.5 cm de profondeur (plâtre-PVC et sable-PVC) sont bien mieux localisées que par la méthode géoélectrique seule (Figure IV.9 et IV.11). De plus, l'épaisseur de variation de sable ( $\theta_2$ ) en centre de modèle est bien estimée et n'est plus associée à une remontée de matériau résistif comme le suggérait l'information géophysique seule (Figure IV.9). L'extension latérale de sable entre 2.5 et 7.5 cm de profondeur est également bien estimée (environ 20 cm de long). La règle de combinaison de Smets, quant à elle, met en évidence le conflit important existant entre les deux sources d'information considérées (Figure IV.17.iv.a), notamment au niveau du plâtre et de la variation d'épaisseur de sable. Du conflit apparaît également en surface (Figure IV.17.a et Figure IV.18.a), cela s'explique par les valeurs de résistivité plus faibles obtenues à l'issue de l'inversion (Figure IV.9). Cette

anomalie pourrait être imputée au rapport profondeur d'enfoncement/espacement des électrodes qui dans notre cas vaut 0.6, ce qui peut générer un effet de court-circuit surfacique lors des mesures, et induire l'apparition d'une couche conductrice en surface après inversion. Ce phénomène est décrit et modélisé par Verdet et al. (2018), généralisant les travaux de Rücker and Günther (2011) pour des matériaux tri-couches. Cette anomalie pourrait aussi être liée à la présence d'une soupe de sable en suspension, plus conductrice, en surface. Enfin, d'éventuelles anomalies dans les résultats d'inversion pourraient être liées à des effets de bord dus à la cuve PVC très résistive et non pris en compte par l'inversion (effets 3D).

Quelle que soit la méthode employée, la présence de l'hypothèse  $\theta_4$  apparaît au niveau des interfaces verticales et horizontales. Cette hypothèse ne correspond à aucun matériau mis en place dans le banc d'essai. Les masses de croyance associées à  $\theta_4$  sont cependant toujours parmi les plus faibles (Figure IV.17.iv.b et iv.d). Le fait que cette hypothèse ( $\theta_4$ ) transparaisse est à imputer à l'incapacité de la méthode géoélectrique et de la méthode d'inversion choisie (lissante, non focalisée sur des interfaces) à proposer des positions d'interfaces franches à l'issue de l'inversion. Une diminution générale de la confiance au-delà de 15 cm est également observée. Elle correspond à la profondeur d'investigation maximum des sondages. Au-delà de 15 cm, les résultats de fusion sont donc uniquement renseignés par l'information issue de l'acquisition géophysique.

## 5.2 Influence du nombre et de la position des sondages

La première intuition aurait pu être de supposer que plus le nombre de sondages diminue, plus la méthode serait mise en difficulté pour caractériser la section investiguée. Bien que cela soit en partie vrai, la qualité des résultats ne repose pas tant sur la quantité que sur la position desdits sondages. En effet, la variation d'épaisseur de sable, contenu entre les deux blocs de plâtre (Figure IV.7), est aussi bien caractérisée en matière d'extensions que ce soit avec 3 ou 5 sondages (Figures IV.17.ii.c et iii.c). Le niveau de confiance associé est également équivalent (Figures IV.17.ii.d et iii.d). Il s'avère que les masses de croyance associées à l'hypothèse  $\theta_1$  (plâtre) sont inférieures pour des résultats de fusion issus d'une campagne à 3 sondages (Figure IV.17.iib et ii.d) que pour les résultats d'une campagne à 2 sondages (Figure IV.17.i.b et i.d).

L'explication de tels résultats réside dans le fait qu'être en présence de sondages consécutifs, renseignant sur la présence de différents matériaux à même profondeur, induit une diminution rapide de la confiance attribuée aux hypothèses caractérisée dans les sondages. Par conséquent, une plus grande confiance est donnée à la source d'information géophysique qui a alors plus d'influence sur les résultats de fusion, expliquant la présence accrue de  $\theta_4$ , qui reflète la transition graduelle de résistivités électriques. Les masses associées à cette hypothèse restent cependant relativement faibles. En revanche, si deux forages consécutifs présentent des valeurs géotechniques semblables à même profondeur, le taux de décroissance latéral sera faible et la masse associée à ce matériau « autre » sera alors relativement faible entre ces deux sondages, à l'issue de la fusion. Ceci explique pourquoi la variation d'épaisseur de sable

n'apparaît pas dans les résultats de fusion avec deux sondages (Figures IV.17.i.a et i.c) : aucun sondage ne passe par cette variation et la source géophysique n'est pas en mesure d'identifier ce matériau comme étant du sable saturé. La force de ces résultats réside dans le fait qu'ils suggèrent la présence d'un matériau autre ( $\theta_4$ ), laissant donc supposer que l'investigation doit être renforcée à cet endroit pour définir précisément la nature du matériau présent.

Le conflit représenté dans les résultats issus de la combinaison de Smets (Figures IV.17 i.a, ii.a, iii.a et iv.a) n'est pas non plus fonction du nombre de sondages géotechniques. Dans cette étude, les cas de fusion entraînant le plus de conflit sont les cas à 2 et 8 sondages. Il ne faut donc pas confondre la notion de « conflit » avec la notion de « manque de connaissance ». Les zones de conflit mettent en évidence des informations contradictoires entre les sources. Ces zones sont généralement situées entre deux sondages consécutifs fournissant les mêmes informations, mais allant à l'encontre des informations géophysiques disponibles. Ce sont donc des zones potentiellement anomaliques où les informations géophysiques doivent être considérées avec prudence, en particulier si la masse de croyance associée à l'hypothèse retenue après normalisation (DS ou PCR6) est très faible.

### 5.3 Considérations importantes et potentiel d'application

Il est important de considérer que l'efficacité de cette méthodologie de fusion a ici été évaluée en comparant les résultats issus de la fusion à un modèle cible (Figure IV.7). Ce modèle cible reste une représentation idéalisée de la structure du banc d'essai et pourrait être, à certains endroits, plus ou moins éloigné de la réalité du modèle expérimental (interfaces réelles ni parfaitement horizontales ou verticales, matériaux non parfaitement homogènes, effets 3D négligés, etc...). L'approche est donc ici légèrement différente des études sur modèles numériques présentées aux Chapitres II et III où le modèle cible est « certain ». Afin de contrôler l'efficacité de la méthodologie, il avait été envisagé de procéder à des vérifications a posteriori des matériaux constitutifs du banc d'essai. Malheureusement, pour des raisons pratiques, cela n'a pas été possible (remaniement des matériaux induisant une modification de leurs propriétés physiques, interaction avec l'eau, coupes et extractions délicates).

Concernant la méthodologie de fusion développée et appliquée ici, l'aspect le plus discutable est la valeur de  $k = 0.1$  fixée pour le coefficient de décroissance latérale de la confiance. Cette valeur a été fixée en accord avec l'hypothèse, a priori respectée, de sélection de matériaux homogènes dans l'espace. Cependant, comme relevé et expliqué Section B.4.3.2 et discuté Section B.4.4, cette faible valeur peut amener à une asymétrie de la décroissance de la confiance entre deux sondages si d'autres conditions sont réunies. Ces conditions sont i) la présence de deux sondages consécutifs qui, à profondeur donnée, renseignent la présence de deux matériaux distincts, ii) des gammes de paramètre géotechnique d'ordres de grandeur très différents (Figure IV.14). L'impact de ce biais sur les résultats de fusion est cependant très relatif et non visible pour une valeur de  $k = 0.5$  (Figure IV.18). Cette valeur, plus prudente, réduisant l'extension de la confiance associée à l'information géotechnique,

caractérise toutefois moins bien la partie inférieure des blocs de plâtre.

## 6 Conclusion

Une expérimentation en banc d'essai à échelle réduite a été menée, en tant qu'étape intermédiaire indispensable entre nos études synthétiques (Chapitres II et III) et nos essais de validation in situ (Chapitre V). Dans cette **Partie B**, l'application de la méthodologie de fusion, à partir de données acquises sur de véritables matériaux mis en place au sein d'un banc d'essai, a pu être présentée. Les résultats de fusion ont été présentés en suivant deux règles de combinaison (Smets et PCR6) et pour quatre simulations différentes en matière de quantité et de position des sondages. Des résultats à partir d'une simulation de huit sondages, pour une valeur de coefficient de décroissance latérale plus important ont également été présentés en suivant trois règles de combinaison (Smets, DS et PCR6).

Les résultats ont mis en évidence la capacité de la méthodologie de fusion développée à caractériser correctement les matériaux du banc d'essai et à localiser les positions des interfaces (verticales et horizontales) entre les matériaux. Ces positions d'interfaces pourraient potentiellement correspondre aux **zones où le risque de développement de l'érosion interne est le plus grand sur de véritables ouvrages**. Cette étude a également permis de faire ressortir l'importance de la quantité mais surtout de la position de l'information géotechnique tout en faisant apparaître une limite à la méthode de calcul de  $C_v$  dans certains cas que nous avons détaillés.

Dans le prochain chapitre de ce manuscrit, il sera question de tester la méthodologie de combinaison sur des données acquises sur une véritable digue de protection fluviale, en considérant la fusion d'informations issues de trois sources d'information.

---

## Chapitre V

### Application à un ouvrage hydraulique réel

---

Après avoir validé la méthodologie de fusion développée à l'aide de modèles numériques et d'un modèle expérimental de laboratoire, ce cinquième et dernier chapitre est dédié à l'utilisation de la méthodologie de fusion à partir de données acquises dans le cadre d'une campagne de reconnaissance sur un véritable ouvrage hydraulique en terre. La **Partie A** est dédiée à la présentation de l'historique de l'ouvrage ainsi qu'aux méthodes de reconnaissance employées et aux données acquises lors de la campagne réalisée durant l'été 2018. La **Partie B** se concentre sur le traitement des données et leur emploi dans le cadre de la méthodologie développée, afin de proposer une caractérisation 2D de l'ouvrage sur la portion investiguée. Ces travaux ont été présentés lors de la conférence internationale Near Surface Geoscience 2019 (Dezert et al., 2019c) et ont été soumis dans la revue *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

---

# Chapitre 5

---

<b>A</b>	<b>Application à un ouvrage hydraulique réel</b>	177
1	Introduction	177
2	Ouvrage hydraulique de St-Clément-des-Levées	177
2.1	Présentation et historique des précédentes campagnes	177
2.2	Localisation des investigations et conditions environnementales	179
3	Tomographie de résistivité électrique	180
3.1	Dispositif et historique de mise en place	180
3.2	Traitement des données et résultats d'inversion	181
4	Carottages et essais de granulométrie	182
4.1	Présentation de l'essai	182
4.2	Caractérisation des matériaux	182
4.3	Résultats	183
5	Essais au CPT	184
5.1	Présentation de l'essai	184
5.2	Caractérisation des matériaux et $I_{SBT}$	185
5.3	Résultats	185
6	Conclusion	186
<b>B</b>	<b>Méthodologie de fusion appliquée aux acquisitions sur ouvrage hydraulique réel</b>	188
1	Introduction	188
2	Cadre de discernement	188
3	Section d'étude	189
4	Source d'information géophysique : Tomographie de Résistivité Electrique	190
4.1	Caractérisation du cadre de discernement	190
4.2	Attribution des masses de croyance	191
5	Sources d'information géotechniques : Essais de granulométrie et essais CPT	192
5.1	Caractérisation du cadre de discernement	192
5.2	Essais de granulométrie	193
5.3	Essais de CPT	196
6	Résultats de fusion	198
6.1	Fusion de données TRE et CPT	198
6.2	Fusion de données TRE et Essais de granulométrie	200
6.3	Fusion de données issues des trois sources d'informations	201
6.4	Discussion	203
7	Conclusion	204

---

# Partie A

## Application à un ouvrage hydraulique réel

### 1 Introduction

La méthodologie de fusion développée a précédemment pu être mise en œuvre à la fois à partir de données simulées ainsi qu'à partir de données acquises en laboratoire. Dans ce chapitre, nous proposons de confronter notre méthodologie à de véritables données de terrain acquises sur un ouvrage hydraulique en terre.

L'ouvrage mis à disposition est une digue de protection fluviale située à St-Clément-des-Levées (49). Il s'agit d'un ouvrage déjà bien documenté et ayant fait l'objet de nombreuses campagnes en amont de ce travail de thèse. Nous présentons dans cette **Partie A** le site expérimental, les caractéristiques connues de l'ouvrage, ainsi que les campagnes de reconnaissance qui y ont déjà été réalisées.

Dans le cadre de notre étude sur site, contrairement aux exemples des chapitres précédents, nous utiliserons des données issues de trois sources d'information distinctes. Les **trois** méthodes d'investigation employées sont la i) méthode de **TRE**, ii) la méthode du **CPT** et iii) l'**analyse granulométrique** en laboratoire suite à la réalisation d'essais carottés. Les essais géotechniques sur site ont été réalisés et supervisés par les équipes de techniciens du Cerema d'Angers et de Blois.

Nous présentons dans cette **Partie A**, les types d'essais réalisés ainsi que les normes et résultats associés avant de décrire leur fusion dans la **Partie B**.

## 2 Ouvrage hydraulique de St-Clément-des-Levées

### 2.1 Présentation et historique des précédentes campagnes

Notre objet d'étude est une digue de protection fluviale située sur la commune de St-Clément-des-Levées (49) à proximité de Saumur (France) dans le val d'Authion (Figure V.1). Il s'agit d'une levée composée d'un remblai argilo-sableux avec présence d'un socle rocheux (craies) datant du Turonien (- 93,9 et - 89,8 ± 0,3 Ma), surmonté de matériaux alluvionnaires (Figure V.2). Cet ouvrage hydraulique est ancien (XII<sup>ème</sup> siècle). L'ouvrage ne présente pas de noyau étanche, comme il serait possible d'en rencontrer dans d'autres types de structures.

Un dispositif électrique, laissé à demeure, a également été mis en place en 2008, composé de deux lignes d'électrodes enterrées en crête d'ouvrage, côté Loire et côté val (Figure V.2). Puisque la ligne d'électrodes située côté val est utilisée dans le cadre de cette étude, plus de détail sont fournis à son sujet section 3.

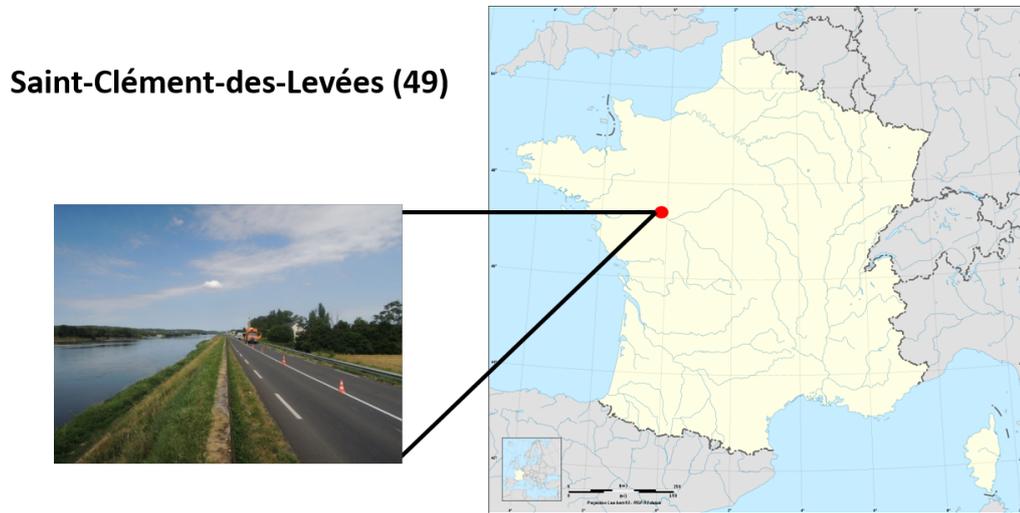


FIGURE V.1 – Localisation de la digue de Loire de St-Clément-des-Levées (49)

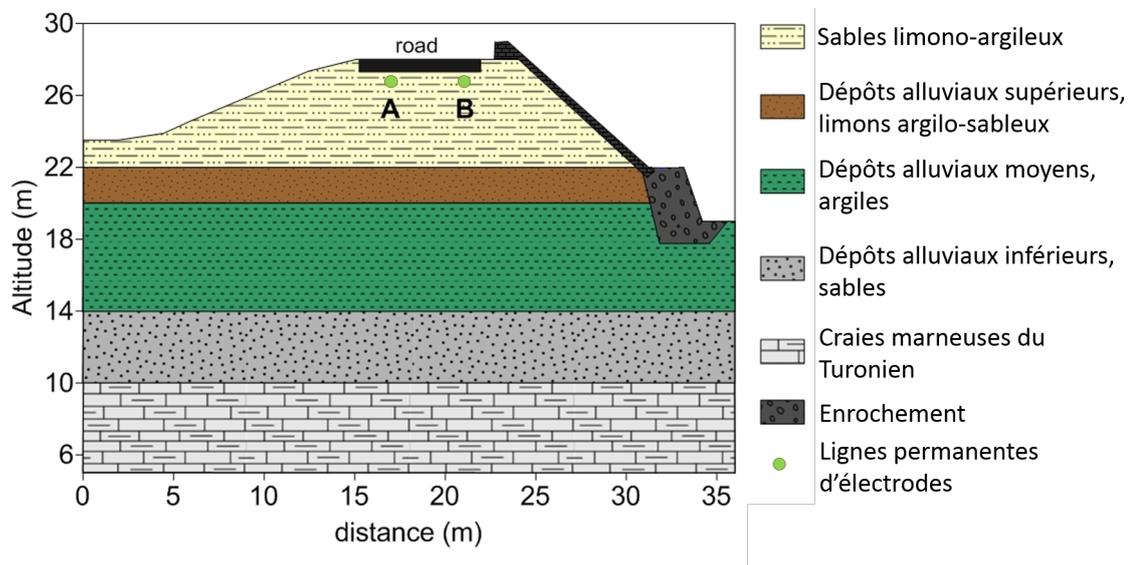


FIGURE V.2 – Coupe lithologique schématisée de la digue de St-Clément-des-Levées présentant les positions des matériaux géologiques et les positions des lignes d'électrodes à demeure dans l'ouvrage (modifié d'après Jodry et al. (2019)).

En ce qui concerne l'investigation géophysique, dans le cadre de l'opération SOLEM (IFSTTAR, CER de Rouen, LRPC de Rouen, Angers, St-Brieuc, Autun, Aix-en-Provence et Nancy), des campagnes **RMT**, **EM31**, **GPR** et **TRE** ont été menées de 2008 à 2010 (Hervé and Bénot, 2013). Une campagne de **MASW** (réalisée par

le LCPC – Nantes) a également été menée en 2010 dans le cadre d’un stage (réalisé par Thibaud Chevalier au Cerema d’Angers). Pour diverses raisons, que nous n’abordons pas ici, les méthodes de RMT, GPR et de conductivimétrie n’ont pas fourni de résultats probants ou fusionnables en l’état.

Depuis 2008, de nombreuses investigations géotechniques ont également été réalisées (essais au **Perméafor**, essais **pressiométriques** et essais en laboratoire sur des échantillons prélevés : **analyse granulométrique**, **teneur en argile**, **teneur en eau** et **densité**). Enfin, en 2011, des sondes de température et de succion, ainsi que deux piézomètres ont été mis en place (Figure V.3).

## 2.2 Localisation des investigations et conditions environnementales

Dans le cadre de notre étude, les campagnes de reconnaissance ont été menées sur l’ouvrage sur plusieurs jours, entre le 26 juin et le 5 juillet 2018. Les essais ont été réalisés sur plus de 120 mètres de long. Les positions des piézomètres, de la ligne d’électrodes enterrées, et des essais géotechniques (CPT et essais carottés) sont présentées Figure V.3. Les sondages carottés et CPT sont identifiés aux mêmes positions puisque ces essais ont été réalisés à proximité les uns des autres et qu’un seul jeu de coordonnées GPS a été relevé pour chacune de ces quatre positions. Les dates auxquelles ont été réalisés les différents essais sont précisées Table V.1.

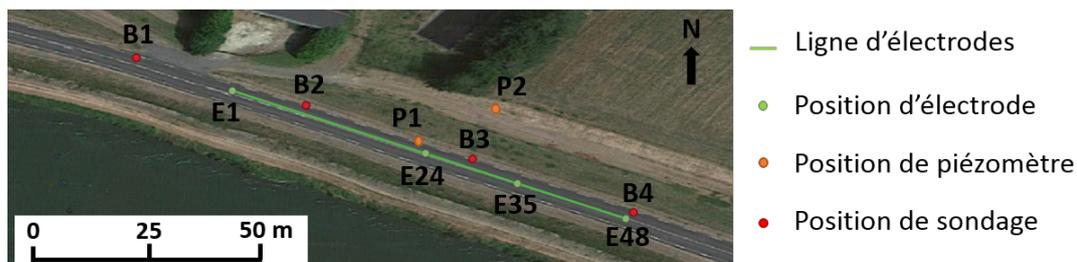


FIGURE V.3 – Digue de St-Clément-des-levées avec localisation de la ligne d’électrodes enfouies, des positions des piézomètres et des sondages géotechniques (CPT et carottages).

Au cours de cette période de 10 jours, les hauteurs d’eau de la Loire connaissent une variation maximale de 30 cm, la hauteur de la Loire étant particulièrement faible à cette période de l’année. La hauteur de la nappe, mesurée à l’aide des piézomètres, n’a malheureusement été relevée qu’une seule fois, après la réalisation des essais, le 10 juillet. Ce relevé suggère une présence de la nappe à environ 8 mètres de profondeur. Ici, nous ne tiendrons pas compte des éventuelles variations de hauteurs d’eau.

TABLE V.1 – Dates auxquelles ont été réalisés les différents essais de reconnaissance sur la digue de St-Clément-des-Levées lors de l’été 2018.

	B1	B2	B3	B4	
Type et n° d’essai	CPT 1	CPT 2	CPT 3	CPT 4	Piézomètre
Date de l’essai	04/07	04/07	03/07	03/07	05/07
Type et n° d’essai	Carottage 1	Carottage 2	Carottage 3	Carottage 4	TRE
Date de l’essai	03/07	26/06	27/06	03/07	10/07

### 3 Tomographie de résistivité électrique

#### 3.1 Dispositif et historique de mise en place

En 2008, un dispositif de TRE a été mis en place sous forme de deux lignes de 48 électrodes espacées de 2 mètres (Figure V.4).



FIGURE V.4 – a) Réalisation de la tranchée côté val, b) mise en place des électrodes, c) compactage du remblai et d) mise en place de la couche de forme (photo côté Loire). Modifié d’après Hupin and Hervé (2009).

Ces lignes d’électrodes parallèles et distantes de 4 mètres transversalement à la levée (cf. A et B, Figure V.2), ont été disposées à 1.10 m de profondeur sous la chaussée, en crête de digue, après réalisation des tranchées (Figure V.4.a et V.4.b).

Les matériaux du corps de digue ont ensuite été remis en place et compactés (Figure V.4.c) avant l'ajout de la couche de forme, du revêtement de chaussée (Figure V.4.d) et son compactage.

Concernant la reconnaissance réalisée dans le cadre de notre étude, uniquement la ligne d'électrodes enfouie côté Val a été utilisée (ligne A Figure V.2). En matière de protocole expérimental, lors de cette campagne de 2018, aucune modification n'a été apportée au dispositif par rapport à sa mise en place initiale de 2008. Un résistivimètre Syscal Pro Switch (Iris Instruments) a été employé afin de réaliser les acquisitions en configuration Wenner-Schlumberger.

### 3.2 Traitement des données et résultats d'inversion

Suite à l'acquisition géoélectrique, 3 valeurs de résistivités apparentes ont été supprimées car jugées trop bruitées (présentant une valeur d'écart-type supérieure à 5%). Puisque la TRE est une méthode intégrante et que dans ce cas d'étude, les électrodes sont enfouies, il s'agit d'en tenir compte lors de l'inversion. Nous considérons donc une couche de 1.10 m d'épaisseur au-dessus de la ligne d'électrodes avec une résistivité associée (i.e. imposée et non ajustée) d'environ 65  $\Omega$ .m. Cette valeur a été déterminée en considérant la valeur de résistivité moyenne des 50 premiers centimètres de sols suite à un premier processus d'inversion.

Les résultats issus de l'inversion (norme L1) sont présentés Figure V.5, la profondeur 0 m correspond à la position verticale des électrodes et non à la crête de l'ouvrage, la couche imposée au-dessus des électrodes n'apparaît donc pas. Un ensemble de matériaux plus résistifs (entre environ 50 et 80  $\Omega$ .m) semble être présent en surface (sur environ 2-3 mètres d'épaisseur) suivi de matériaux plus conducteurs sous-jacents. Un ensemble encore plus conducteur (environ 15  $\Omega$ .m) ressort entre 4.5 et 10 m de profondeur et entre  $x = 46$  et  $x = 70$  m. Cette « anomalie » avait par ailleurs déjà été détectée lors des précédentes campagnes de reconnaissance géoélectriques (Hervé and Bénot, 2013).

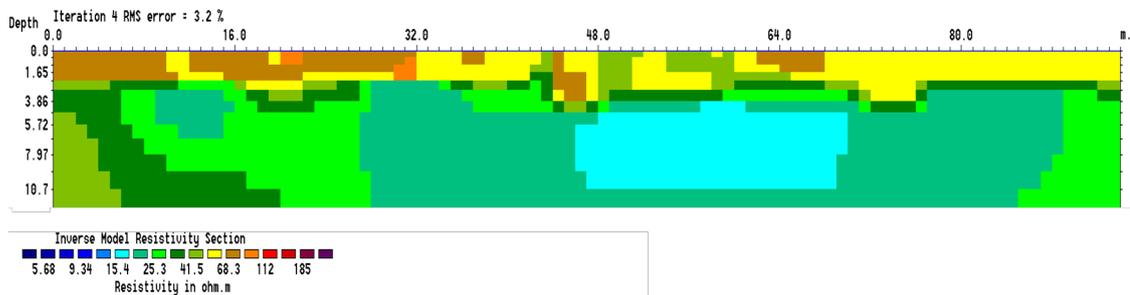


FIGURE V.5 – Coupe longitudinale de résistivités inversées de la digue de protection de St-Clément-des-Levées, obtenue après inversion des données de résistivité apparente (Wenner-Schlumberger) acquises à partir de la ligne d'électrodes A (cf. Figure V.2).

## 4 Carottages et essais de granulométrie

### 4.1 Présentation de l'essai

Quatre essais carottés (Figure V.3) ont été réalisés en crête de l'ouvrage, à l'aide d'une machine Texoma (Figure V.6). Les carottes sont réalisées jusqu'à 7.40 m de profondeur au-delà de la position des électrodes enfouies et ont un diamètre de 10 cm.



FIGURE V.6 – Foreuse carotteuse Texoma sur la digue de St-Clément-des-Levées lors de la campagne de reconnaissance.

Une fois rapportées au laboratoire régional de Blois (Cerema – DTer Normandie Centre), les carottes peuvent être identifiées et des échantillons y sont prélevés afin de réaliser des essais de granulométrie en respectant la norme NF P 94-056 (1996). Comme décrit dans la norme : *« l'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse »*.

### 4.2 Caractérisation des matériaux

En laboratoire, les carottes sont identifiées visuellement ainsi qu'au toucher par un technicien afin de délimiter les sections de matériau qui sont considérées comme appartenant à la même classe granulométrique. La Figure V.7 présente le contenu de

la carotte n° 1 et les limites fixées par le technicien (en rouge). Cette identification est faite préalablement aux essais de granulométrie.



FIGURE V.7 – Exemple de la carotte n° 1 avec délimitations établies par le technicien au laboratoire (en rouge), profondeurs renseignées sur les étiquettes en considérant la profondeur 0 m comme étant la position verticale des électrodes (1.10 m sous la surface).

### 4.3 Résultats

Les résultats des analyses granulométriques mettent en évidence l'existence de deux principales classes granulométriques de sols, telles que décrites dans la norme NF P 11-300 (1992). Les deux principales catégories de matériaux caractérisées sont les matériaux fins (appelés « **matériaux A** » au sens du guide des terrassements routiers, **GTR**) et les matériaux sableux à graveleux avec présence de fines (appelés « **matériaux B** » au sens du GTR).

Il s'avère en effet que les résultats présentent une valeur de **D<sub>max</sub>** toujours inférieure à 50 mm, nous utilisons donc la valeur du tamisat à 80  $\mu\text{m}$  pour distinguer les matériaux A des matériaux B. Si cette valeur est supérieure à 35%, le matériau géologique est considéré comme appartenant à la classe **A**. Sinon, il est considéré comme appartenant à la classe **B**. L'imprécision considérée correspond à 0.1% de la valeur de pesée comme indiqué dans la norme NF P 94-056 (1996).

Les classes de matériaux associées aux résultats des analyses granulométriques réalisées sont présentées Figure V.8, en considérant la profondeur  $z = 0$  m comme étant la profondeur à laquelle sont enterrées les électrodes. Les lignes noires horizontales représentent la délimitation des matériaux réalisée par l'inspection visuelle du technicien. Ces résultats indiquent que les matériaux B semblent présents dans la partie supérieure de l'ouvrage (de 0 à 3,40 m de profondeur pour les carottes n° 2 et 3), tandis que les matériaux plus fins « A » semblent situés en-dessous.

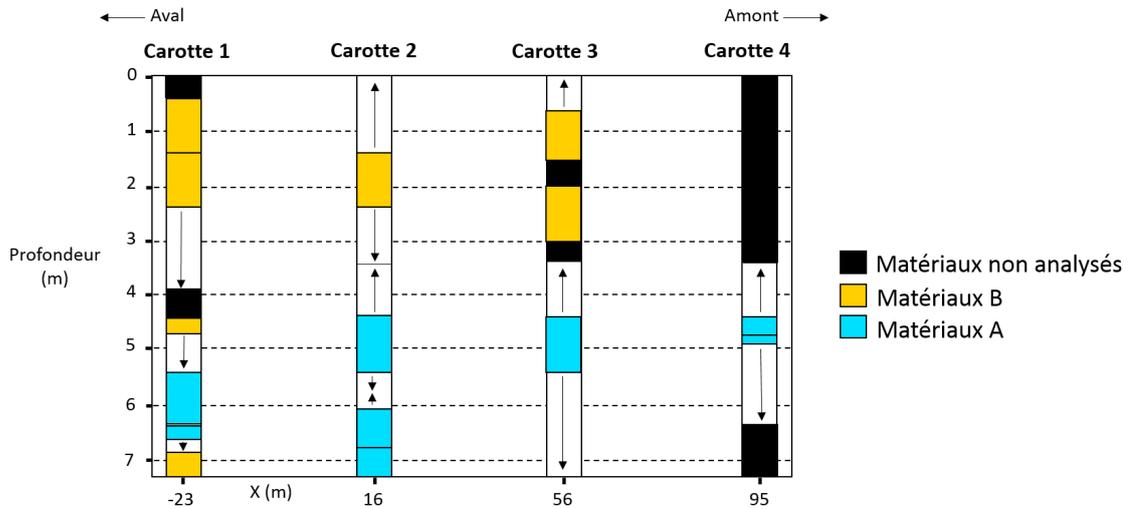


FIGURE V.8 – Représentation de la répartition des classes de matériaux « A » et « B » (norme NF P 11-300 (1992)) suite à l'analyse granulométrique d'échantillons issus de 4 carottes prélevées sur la digue de St-Clément-des-Levées. Les plages bleues et jaunes représentent les échantillons analysés et leur classe de matériau associée. Les flèches représentent l'extension jugée valide de cette caractérisation, en accord avec l'inspection visuelle préalable du géotechnicien.

## 5 Essais au CPT

### 5.1 Présentation de l'essai

Comme pour les essais carottés, les essais au CPT sont réalisés en 4 points, en crête de l'ouvrage (Figures V.3 et V.9).



FIGURE V.9 – a) Machine Gouda et b) pointe utilisée sur la digue de protection de St-Clément-des-Levées pour les essais CPT.

Une machine Gouda (Figure V.9.a) est utilisée avec une pointe conique de 3.6 cm de diamètre (Figure V.9.b) et avec acquisition de valeurs tous les 10 cm en respectant la norme NF P 94-113 (1996). Les essais sont menés jusqu'à une profondeur de 8.80 m sous la position des électrodes. Les principes de ce type d'essai au CPT sont disponibles Chapitre I.

## 5.2 Caractérisation des matériaux et $I_{SBT}$

A partir des valeurs mesurées de **frottement latéral**,  $f_s$  [MPa], et de **résistance de pointe**,  $q_c$  [MPa], il est possible de déterminer la valeur d'un indice de comportement des sols noté  $I_{SBT}$  pour « **Soil Behavior Type Index** », proposé par Robertson (2010) et présenté Eq V.1 :

$$I_{SBT} = \sqrt{(3.47 - \log(\frac{q_c}{Pa}))^2 + (1.22 + \log(\frac{f_s}{q_c \cdot 10^2}))^2} \quad (V.1)$$

Avec  $Pa = 0.1$  MPa. L'indice  $I_{SBT}$  fournit des informations sur la nature du sol en matière de classe granulométrique et la correspondance entre sa valeur et la classe granulométrique est présentée Table V.2.

TABLE V.2 – Classes granulométriques de sols en fonction des valeurs de  $I_{SBT}$  (Robertson, 2010).

Classe de sol	Valeur de $I_{SBT}$
Matériaux organiques (tourbes)	$3.60 < I_{SBT}$
Argiles (argiles limoneuses à argiles)	$2.95 < I_{SBT} < 3.60$
Mélange limoneux (limons argileux à argiles limoneuses)	$2.60 < I_{SBT} < 2.95$
Mélange sableux (sables limoneux à limons sableux)	$2.05 < I_{SBT} < 2.60$
Sables (sables propres à sables limoneux)	$1.31 < I_{SBT} < 2.05$
Sables (sables graveleux à sables denses)	$I_{SBT} < 1.31$

Comme décrit dans la norme appliquée, l'imprécision maximale sur les valeurs mesurées au CPT ( $f_s$  et  $q_c$ ) est la plus petite des valeurs suivantes :

- soit 5% de la valeur mesurée
- soit 1% de la valeur maximale du domaine de mesure.

Nous ne considérons pas d'erreurs associées au modèle proposé par Robertson (2010) concernant les intervalles de  $I_{SBT}$  (Table V.2).

## 5.3 Résultats

Les valeurs d' $I_{SBT}$ , associées aux résultats des acquisitions pour les quatre sondages, sont présentées Figure V.10. Les valeurs d'imprécisions sont prises en compte

mais trop faibles pour être visibles Figure V.10. La profondeur  $z = 0$  m correspond à la profondeur des électrodes enfouies. Ces valeurs d' $I_{SBT}$  suggèrent que la plupart des matériaux rencontrés correspondent à des mélanges sableux. Localement, des matériaux sont considérés comme appartenant aux classes « sables » ou « matériaux limoneux ».

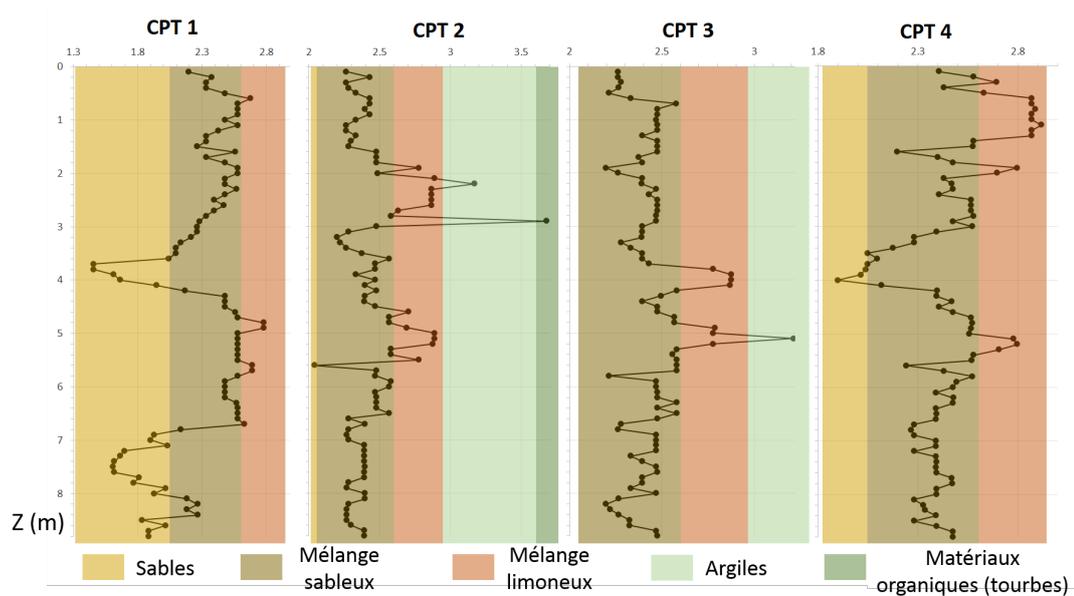


FIGURE V.10 – Profils verticaux de valeurs d' $I_{SBT}$  pour chaque sondage mettant en évidence la classe granulométrique de sol associée.

Les classes granulométriques suggérées par les valeurs d' $I_{SBT}$  ne sont pas en tout point en accord avec les résultats des analyses granulométriques précédemment présentés (Figure V.8). La correspondance entre classes granulométriques et valeurs de CPT n'est pas aussi fiable que les résultats de l'analyse granulométrique en laboratoire. Il sera nécessaire d'en tenir compte lors de l'application de la méthodologie de fusion, **Partie B**.

## 6 Conclusion

Dans cette première partie, le site d'étude de St-Clément-des-Levées a pu être présenté et les anciennes campagnes de reconnaissance ont également été évoquées. Nous avons détaillé les trois méthodes d'investigation utilisées que sont : la **TRE**, les **essais carottés** et les **analyses granulométriques** de laboratoire qui en découlent ainsi que les essais **CPT**. Les résultats associés et la classe granulométrique correspondante ont également été mis en avant.

A partir de ces résultats il s'agira, dans la prochaine partie de ce chapitre, d'utiliser la méthodologie de fusion en l'adaptant au format de ces données. L'objectif étant de faire ressortir les différentes classes de matériaux de l'ouvrage et leur répartition, en associant des masses de croyance à l'information issue du processus de fusion pour faire ressortir les zones de grande confiance et les zones où l'incertitude est plus importante.

## Partie B

# Méthodologie de fusion appliquée aux acquisitions sur ouvrage hydraulique réel

### 1 Introduction

Dans cette seconde partie, il s'agit d'utiliser les données acquises par les trois sources d'informations introduites **Partie A**, pour mettre en œuvre la méthodologie de fusion développée. Le cadre de discernement  $\Theta$  est d'abord défini afin de fixer les hypothèses le composant. Les intervalles de valeurs physiques associées à ces hypothèses peuvent ensuite être précisés pour chaque méthode de reconnaissance.

Puisque certains sondages sont situés en-dehors de la section investiguée par la TRE (Figure V.3), nous détaillerons dans cette partie comment notre méthodologie s'adapte et permet de prendre en compte ces informations géotechniques extérieures à la section d'étude.

Pour chaque méthode de reconnaissance, nous présentons la distribution des masses de croyance proposée au sein de la section de sous-sol. En ce qui concerne les distributions de masses de croyance associées aux données issues des sources d'informations géotechniques, les résultats sont présentés et comparés pour deux valeurs distinctes de coefficient de décroissance latérale  $k$ .

Les résultats post-fusion sont finalement présentés pour des processus de fusion respectivement réalisés avec 2 et 3 sources d'information (« TRE et CPT », « TRE et essais granulométriques », « TRE, CPT et essais granulométriques »). Il s'agira alors de comprendre et de discuter l'apport d'une troisième source d'information sur les résultats obtenus ainsi que de poser un regard critique sur la qualité des résultats globaux en regard des connaissances actuelles de l'ouvrage étudié.

### 2 Cadre de discernement

Suite aux résultats obtenus par les différentes méthodes d'acquisition, présentés **Partie A**, nous retenons pour cette étude un cadre de discernement  $\Theta$  composé de 3 hypothèses, tel que :

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}. \quad (V.2)$$

Avec  $\theta_1$  correspondant à un matériau lithologique à **grains fins** et  $\theta_2$  correspondant à un matériau géologique composé de **grains plus grossiers**. Nous considérons également, comme l'exige la méthodologie, une hypothèse supplémentaire  $\theta_3$  regroupant des matériaux autres que les deux précédemment décrits.

### 3 Section d'étude

Précédemment, dans le cadre de ce travail de thèse, les limites spatiales des sections de sous-sol considérées ont toujours été fixées par la première et dernière électrode du profil de TRE. Dans le cadre de cette campagne de reconnaissance, deux points d'investigation géotechnique sont cependant localisés au-delà de la première et dernière électrode du profil de tomographie (Figure V.3). Les sondages concernés sont les points **B1** et **B4**.

Il s'agit donc d'être en mesure de prendre en compte l'information géotechnique extérieure à la section géophysique tout en proposant des résultats de fusion uniquement sur la section de sous-sol où l'information géophysique est présente. La procédure retenue est illustrée Figure V.11. Elle consiste à **traiter l'information géotechnique sur l'ensemble du sous-sol** depuis le premier sondage (B1) jusqu'au dernier (B4). Ainsi, des distributions de masses de croyance sont associées aux hypothèses de  $\Theta$  sur toute la section en tenant compte des valeurs physiques mesurées aux points B1 et B4. Ces valeurs impactent le niveau de décroissance de la confiance associée aux différentes hypothèses depuis les sondages B2 (vers la gauche, flèche orange) et B3 (vers la droite, flèche violette).

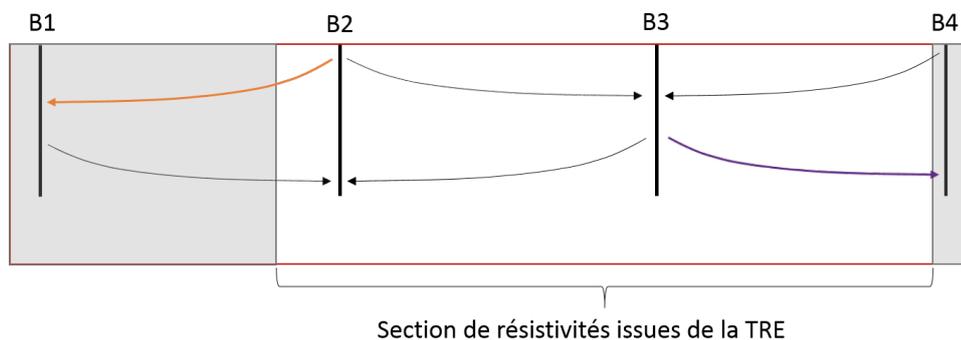


FIGURE V.11 – Schéma représentant la prise en compte des informations géotechniques extérieures à la section caractérisée par la source géophysique. L'opération de fusion n'a en revanche lieu que sur la surface dont les limites correspondent aux positions de la première et dernière électrode (surface non grisée). Les flèches symbolisent la décroissance exponentielle latérale de la confiance en l'information géotechnique depuis les sondages.

En revanche, lors du processus de fusion d'informations géophysiques et géotechniques, nous faisons le choix de considérer la section de résistivités électriques comme celle délimitant la grille spatiale sur laquelle travailler. Les distributions de masses de croyance géotechniques extérieures à cette grille ne sont donc plus exploitées par la suite (surfaces grisées Figure V.11).

## 4 Source d'information géophysique : Tomographie de Résistivité Electrique

### 4.1 Caractérisation du cadre de discernement

Afin de fixer les bornes des intervalles de résistivités électriques à associer aux hypothèses de  $\Theta$ , nous proposons une représentation sous forme de classes modales (Figure V.12) des valeurs de la section de résistivités inversées présentée Figure V.5. La précision, à deux décimales près, des valeurs des classes représentées Figure V.12 importe peu dans la méthodologie de caractérisation des bornes que nous employons et nous sommes conscients que cette précision est superflue pour une interprétation géophysique. C'est en effet la tendance générale de la distribution des valeurs qui doit permettre de mettre en évidence les grands ensembles de matériaux constitutifs du sous-sol.

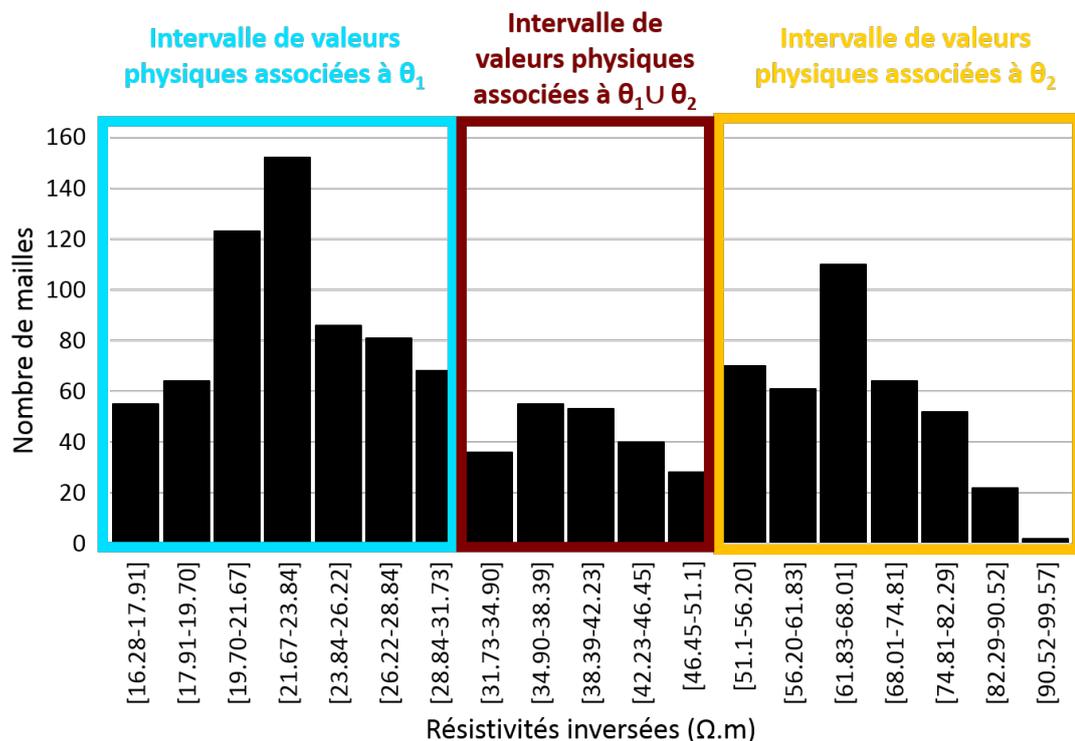


FIGURE V.12 – Distribution sous forme de classes modales des valeurs de résistivités électriques issues de l'inversion.

Ce découpage subjectif de classes (axe des abscisses, Figure V.12) provient du calcul des valeurs des bornes, réalisé en considérant la suite géométrique suivante :

$$b_{n+1} = 1.1 b_n \quad (\text{V.3})$$

Avec  $b_n$  la borne inférieure de l'intervalle  $n$ ,  $b_{n+1}$  la borne supérieure et  $b_0 = 2\Omega.m$ .

La représentation sous forme de classes modales (Figure V.12) associée à la lecture de la Figure V.5 suggère la présence de deux matériaux de nature distincte : i) un matériau de plus faible résistivité (en bleu, Figure V.12) que l'on pourrait associer à l'hypothèse  $\theta_1$  d'un matériau fin et ii) un matériau de résistivité plus importante (en orange, figure V.12) que l'on pourrait associer à l'hypothèse  $\theta_2$  d'un matériau plus grossier.

La délimitation entre ces deux classes n'est cependant pas franche. Nous proposons donc d'associer les valeurs intermédiaires de résistivités à l'hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2$ , suggérant que ces valeurs de résistivités peuvent être rattachées à l'hypothèse  $\theta_1$  **ou**  $\theta_2$ . Ainsi les bornes des classes de résistivités électriques ( $\Omega.m$ ) sont fixées telles que :

- [16.28, 31.73] soit associée à l'hypothèse  $\theta_1$ ,
- [51.1, 99.57] soit associée à l'hypothèse  $\theta_2$ ,
- ]31.73, 51.1[ soit associée à l'hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2$ ,
- [5.19, 16.28[ $\cup$ ]99.57, 312.45] soit associée à l'hypothèse  $\theta_3$ .

## 4.2 Attribution des masses de croyance

Les masses de croyance sont attribuées en utilisant la méthode n°4 (distances de Wasserstein et aire sous la Gaussienne, cf. Chapitre II, Partie B.). Les résultats de cette attribution sont présentés Figure V.13.

Il apparaît que l'hypothèse  $\theta_2$  est majoritaire sur la quasi-totalité de la section, depuis la ligne d'électrodes jusqu'à environ 2.5 mètres de profondeur. L'hypothèse  $\theta_1$  se retrouve ensuite dans la majorité du sous-sol hormis à l'extrême gauche de la section, à l'interface entre les deux ensembles, ainsi que très localement au voisinage des électrodes en centre de section où l'hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2$  ressort (Figure V.13.a).

La zone « anomalique » de résistivité inversée relevée Figure V.5, fait décroître le niveau de confiance associé à la caractérisation du sous-sol entre  $x = 48$  et  $x = 70$  m et entre  $z = 5$  et  $z = 10$  m (Figure V.13.b). La confiance associée à cette distribution de masses de croyance est également plus faible dans la partie gauche de la section.

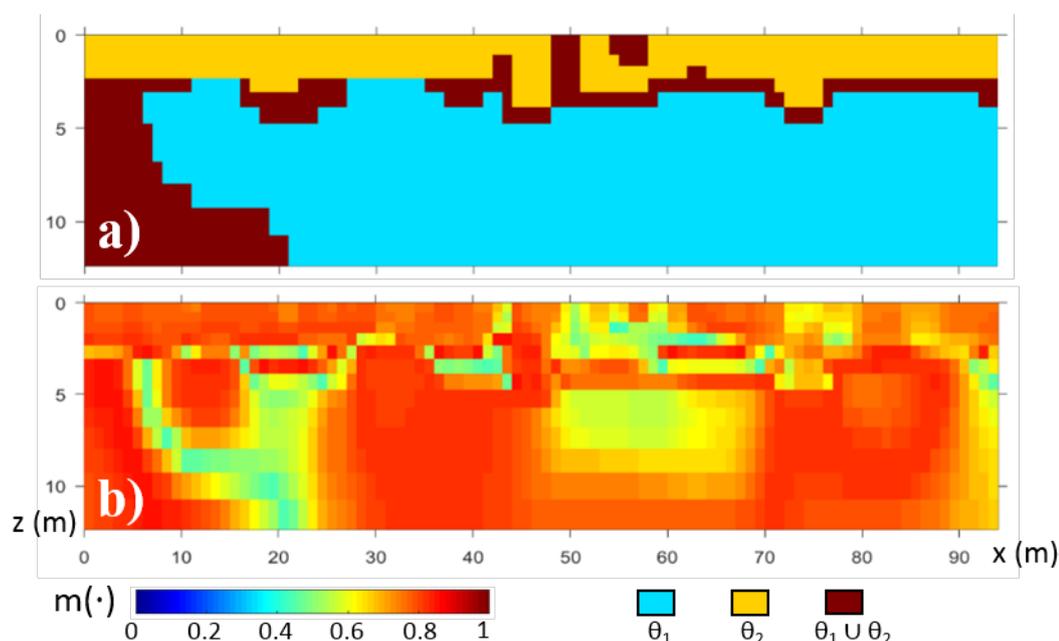


FIGURE V.13 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issues de l’information géophysique et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a).

## 5 Sources d’information géotechniques : Essais de granulométrie et essais CPT

### 5.1 Caractérisation du cadre de discernement

Concernant la caractérisation du cadre de discernement pour les **essais de granulométrie**, nous reprenons la classification de la norme NF P 11-300 (1992) et rattachons les « **matériaux A** » à l’hypothèse  $\theta_1$  et les « **matériaux B** » à l’hypothèse  $\theta_2$ .

Pour la caractérisation par la **méthode CPT**, nous considérons que les matériaux géologiques fins associés à l’hypothèse  $\theta_1$  sont caractérisés par une valeur de  $I_{SBT} > 2.6$ . Lorsque  $I_{SBT} < 2.6$ , les matériaux sont considérés plus grossiers et les résultats du CPT sont associés à l’hypothèse  $\theta_2$ . Il s’agit de la limite théorique (Robertson, 2010) entre les sols limoneux et sableux (Table V.2)

La Figure V.14 est proposée afin de visualiser les hypothèses rattachées aux valeurs obtenues par les deux types d’essais géotechniques (essais granulométriques et CPT). Ce schéma permet de replacer les résultats géotechniques dans la section par rapport à la position des électrodes, en considérant la position de la première électrode comme l’origine des coordonnées. Cette représentation met en évidence le fait que l’hypothèse de matériaux « autres »,  $\theta_3$ , n’est jamais associée aux résultats d’essais géotechniques. En effet, ici, les essais géotechniques ne peuvent pas renseigner sur la présence d’un matériau qui serait considéré comme « autre » au vu de la

caractérisation du cadre de discernement qui a été fixée ci-dessus. En revanche, s'il y a un défaut d'informations, l'hypothèse associée sera l'union des trois hypothèses de  $\Theta : \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$ , correspondant à l'**incertitude absolue**.

La Figure V.14 met également en évidence le fait que les résultats issus des deux méthodes de reconnaissance géotechniques ne sont pas parfaitement en accord. L'hypothèse  $\theta_2$  est en effet bien plus souvent caractérisée par le CPT que par les essais de granulométrie.

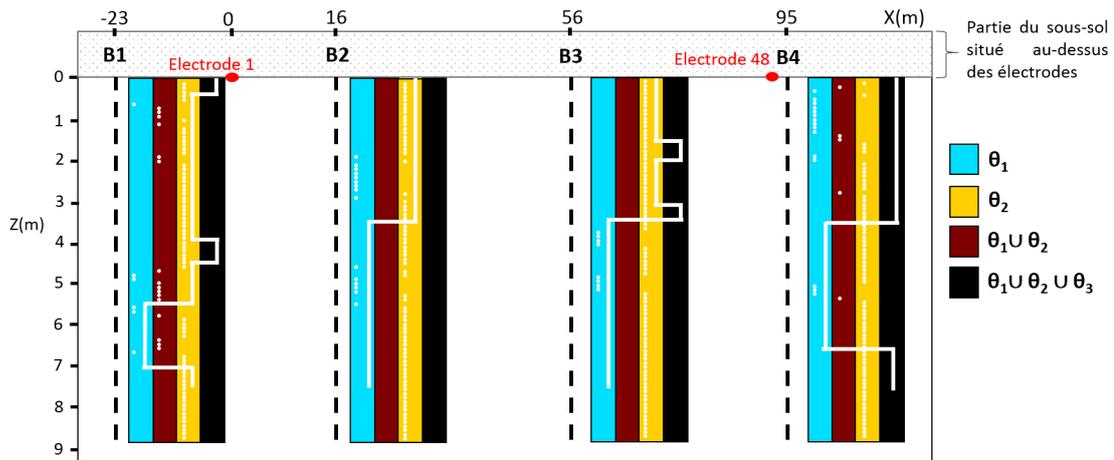


FIGURE V.14 – Schéma représentatif de la section de digue étudiée, avec la position des essais géotechniques (pointillés noirs) et les hypothèses de  $\Theta$  associées aux valeurs d' $I_{SBT}$  (pointillés blancs) et aux résultats d'essais de granulométrie (lignes blanches).

## 5.2 Essais de granulométrie

### 5.2.1 Caractérisation des carottes à partir des échantillons prélevés

Concernant les essais de granulométrie, une masse de croyance de  $M(0) = 0.99$  associée à l'hypothèse caractérisée, est fixée aux profondeurs où les échantillons ont pu être prélevés pour analyse en laboratoire. De façon complémentaire, une masse de  $m(\cdot) = 0.01$  est alors attribuée à l'union des autres hypothèses, en accord avec  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ . Cette valeur importante de  $M(0) = 0.99$  est retenue puisque les essais de granulométrie correspondent aux essais les plus aptes à caractériser la nature granulométrique d'un matériau géologique.

Pour les profondeurs auxquelles aucun échantillon n'a été prélevé, mais pour lesquelles les matériaux appartiennent au même ensemble lithologique (d'après la caractérisation visuelle du géotechnicien) que celui de l'échantillon analysé, nous considérons une extension verticale de l'information (Figure V.15). Une décroissance de la confiance associée à l'hypothèse  $\theta_n$  est réalisée depuis la profondeur limite (notée  $p = 0$  m) de l'échantillon prélevé jusqu'à la limite entre les deux ensembles géologiques fixée visuellement par le géotechnicien (à  $p = 1$  m dans l'exemple de la

Figure V.15). La distance entre ces deux profondeurs est notée  $d$ . Nous choisissons d'exprimer la décroissance de la masse de croyance associée à l'hypothèse considérée ainsi :

$$m(\theta_n; p) = 0.99(1 - e^{p-d}) \quad (V.4)$$

Alors,  $m(\theta_n; p) = 0$  à la limite entre les deux ensembles géologiques caractérisés. Complémentairement, une masse est allouée à l'union de toutes les autres hypothèses, en accord avec  $\sum_{X_i \in 2^\Theta} m_i(X_i) = 1$ .

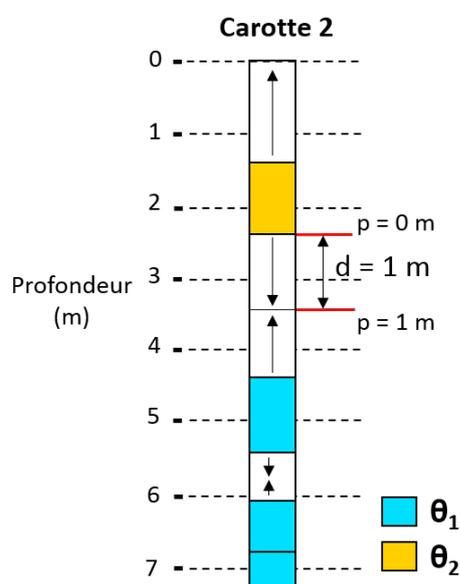


FIGURE V.15 – Représentation de l'extension verticale de l'information granulométrique. Exemple des résultats issus des analyses granulométriques réalisées sur la carotte 2.

La Figure V.15 reprend les résultats des essais de granulométrie réalisés sur la Carotte 2. Les zones colorées correspondent aux profondeurs auxquelles ont été prélevés les échantillons analysés tandis que les flèches symbolisent l'extension verticale de l'information là où les matériaux n'ont pas subi d'analyse granulométrique. Les valeurs de  $p$  et de  $d$  représentées s'appliquent à l'extension verticale de l'information depuis la limite basse de l'échantillon analysé, à 2.40 m de profondeur, jusqu'à la limite entre les deux matériaux, établie visuellement par le géotechnicien, à 3.40 m de profondeur.

### 5.2.2 Attribution des masses de croyance

Après extension latérale de l'information géotechnique depuis les sondages, nous proposons les résultats d'attribution de masses de croyance sur l'ensemble de la section, associés à un facteur de décroissance latérale de  $k = 0.1$  (Figure V.16), et à un facteur de  $k = 1$  (Figure V.17). Un facteur de  $k = 0.1$  supposerait le milieu relativement peu variable horizontalement par rapport à une valeur de  $k = 1$ .

Les résultats (Figure V.16) mettent en avant l'hypothèse  $\theta_2$  sur environ 3.5 m d'épaisseur depuis la position de la ligne d'électrodes puis l'hypothèse  $\theta_1$  depuis 3.5 m de profondeur jusqu'en base de carotte (i.e.  $z = 7.4$  m). A partir de cette caractérisation, le milieu semble s'apparenter à un bicouche strict (aucune alternance verticale entre les matériaux caractérisés). La caractérisation est plus prudente à proximité de la surface, sur la partie droite de la section, et plus sûre d'elle entre les carottes 2 ( $x = 16$  m) et 3 ( $x = 56$  m), entre 4 et 6 m de profondeur.

Pour une valeur de  $k$  plus importante (Figure V.17), la caractérisation est faite sur de moins grandes distances depuis les sondages, et avec des masses de croyance respectivement plus faibles. La proximité des valeurs de tailles de grains entre les carottes 2 ( $x = 16$  m) et 3 ( $x = 56$  m), entre 4 et 6 m de profondeur, permettent tout de même de représenter l'hypothèse  $\theta_1$  de façon continue entre les carottes 2 et 3.

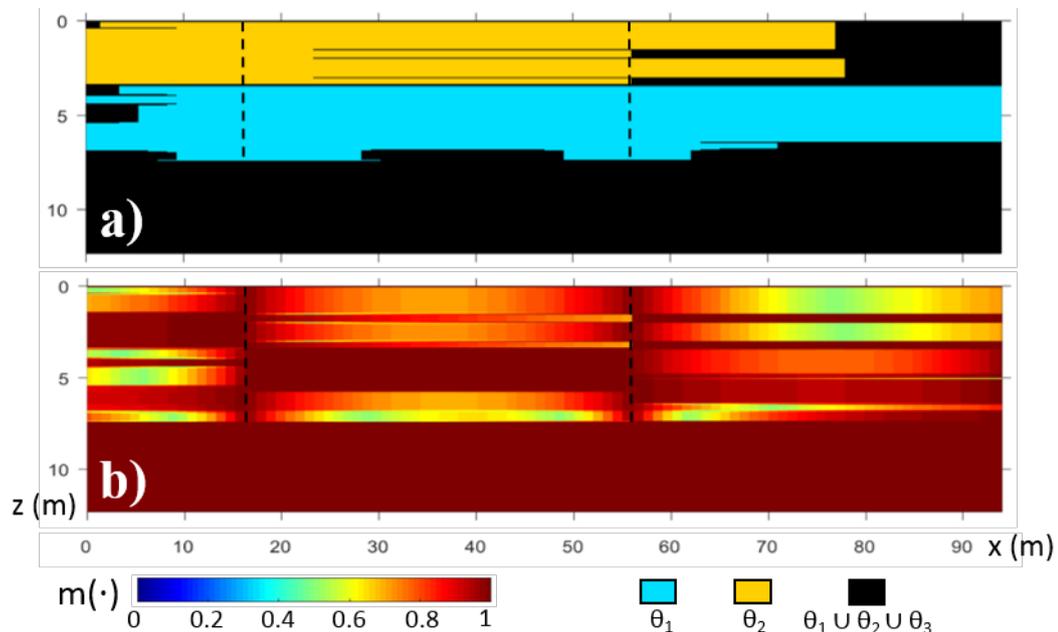


FIGURE V.16 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d'information géotechnique (essais de granulométrie) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale  $k = 0.1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

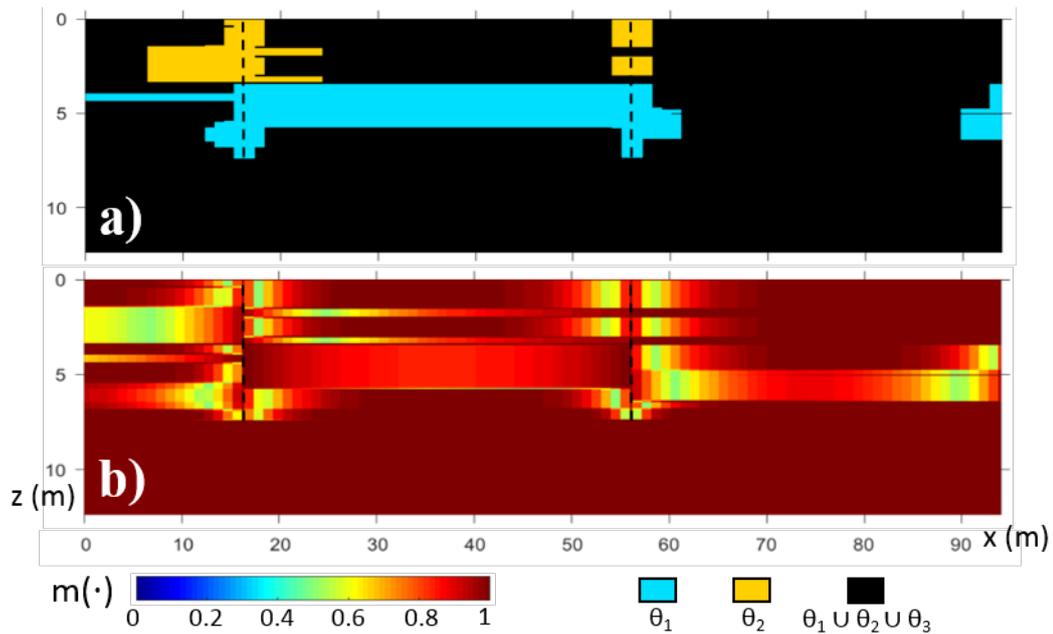


FIGURE V.17 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d’information géotechnique (essais de granulométrie) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale  $k = 1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

### 5.3 Essais de CPT

Concernant les essais de CPT, une masse de croyance de  $M(0) = 0.5$ , associée aux hypothèses caractérisées au niveau des sondages, est fixée. Une valeur moindre que celle employée pour les analyses granulométriques est retenue car l’indice  $I_{SBT}$  n’est pas en mesure de caractériser aussi bien les tailles de grain que les essais de granulométrie réalisés en laboratoire. Comme l’atteste en effet la Figure V.14, les caractérisations issues des analyses granulométriques et des essais CPT ne sont pas en accord constant. La valeur de  $M(0) = 0.5$  permet tout de même à l’hypothèse caractérisée de demeurer majoritaire au niveau du sondage concerné, sans qu’elle ne le soit sur une part trop importante de la section entre les points d’essais au CPT.

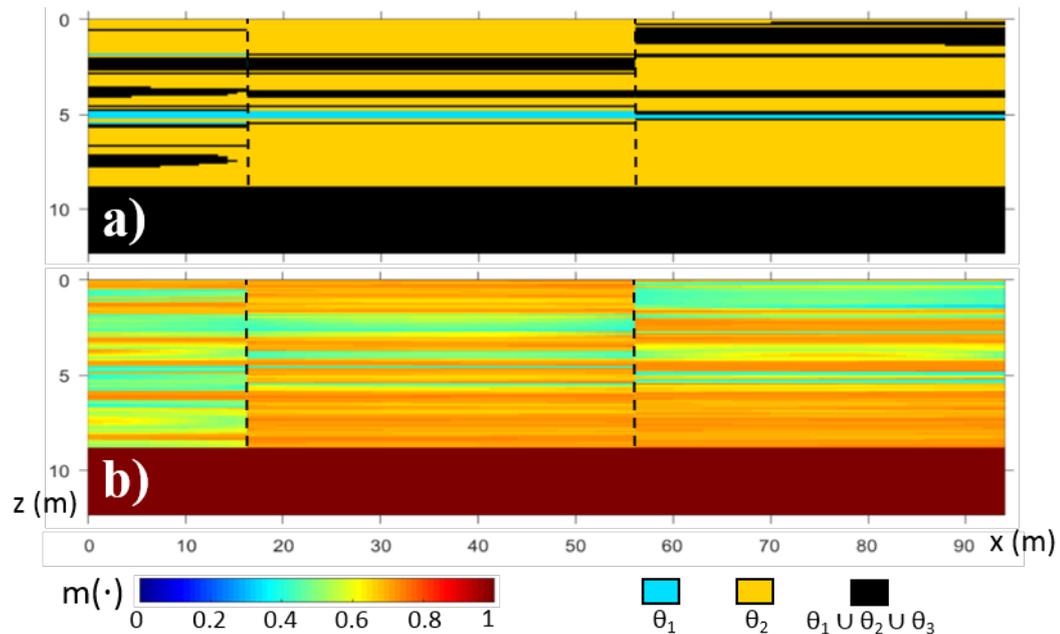


FIGURE V.18 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d’information géotechnique (CPT) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale  $k = 0.1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

Tout comme pour la précédente source d’information géotechnique, nous proposons les résultats pour deux valeurs du facteur de décroissance latérale  $k$ . La Figure V.18 présente les résultats associés à une valeur de  $k = 0.1$  tandis que la Figure V.19 présente les résultats associés à une valeur de  $k = 1$ . Une valeur de  $k = 1$  semble plus prudente et plus pertinente. En effet, les résultats CPT suggèrent une caractérisation presque exclusive de l’hypothèse  $\theta_2$ , il est donc préférable de limiter cette caractérisation aux abords des sondages, comme le suggère la Figure V.19. La Figure V.18 met en avant l’hypothèse  $\theta_2$  sur la presque totalité de la section avec des masses de croyance associées de l’ordre de  $m(\theta_2) = 0.7$  alors que la Figure V.19.a laisse l’incertitude ( $\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$ ) majoritaire sur une large partie de la section en associant des masses de croyance plus faibles à l’hypothèse  $\theta_2$  que ce qui est visible Figure V.18.b.

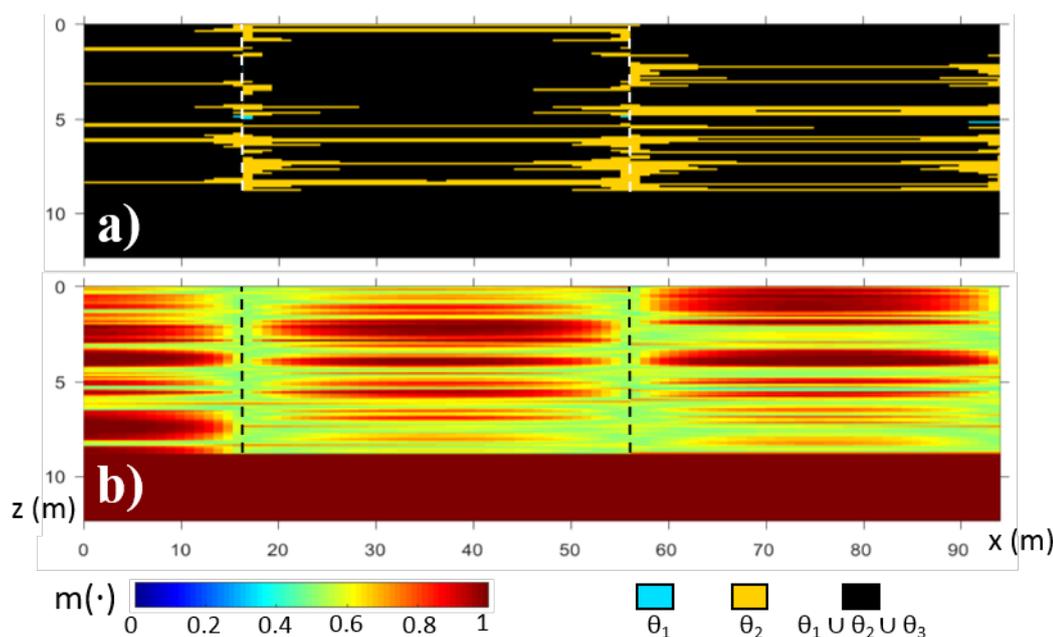


FIGURE V.19 – a) Hypothèses ayant la plus grande masse de croyance issue de la source d’information géotechnique (CPT) et b) représentation des valeurs de masses associées aux hypothèses présentées en a). Résultats pour un facteur de décroissance latérale  $k = 1$ . Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

## 6 Résultats de fusion

Nous présentons dans cette section les résultats de fusion issus de la combinaison des informations provenant des trois méthodes de reconnaissance mais également issus de la combinaison des données « TRE et CPT » et « TRE et analyses granulométriques ». Les résultats sont présentés pour l’utilisation des règles de combinaisons de Smets (hypothèse d’un monde ouvert) et de PCR6 (hypothèse d’un monde fermé). Les résultats associés à la règle de combinaison de DS étant proches des résultats de PCR6 ils ne sont pas présentés dans chacune des sous-sections qui vont suivre mais uniquement dans le cadre de la fusion de données issues de trois sources d’information. Ce choix a été fait afin de ne pas surcharger le document.

### 6.1 Fusion de données TRE et CPT

La Figure V.20 présente les résultats associés à la fusion d’informations provenant de l’acquisition géoélectrique ainsi que des sondages CPT, pour une valeur du facteur de décroissance latérale  $k = 0.1$ , Figure V.20.i, et pour une valeur de  $k = 1$ , Figure V.20.ii.

Les distributions de masses de croyances de chaque méthode de reconnaissance considérée individuellement (Figure V.13, V.18 et V.19), diffèrent de manière importante à partir d’environ 3 m de profondeur. Il est intéressant de voir ici comment la méthodologie de fusion permet de combiner ces deux distributions distinctes. Il

apparaît que pour une valeur de  $k = 0.1$ , le conflit,  $\emptyset$ , est majoritaire sur presque toute la longueur de la section entre environ 4 et 9 m de profondeur (Figure V.20.i.a). Le conflit n'est cependant pas majoritaire sur la partie gauche de la section là où la source géophysique renseignait l'hypothèse  $\theta_1 \cup \theta_2$  (Figure V.13). En effet, la source géophysique ne permettant pas de trancher entre les deux hypothèses, c'est la source géotechnique, caractérisant l'hypothèse  $\theta_2$  à cet emplacement (Figure V.18), qui prend le dessus lors de la fusion.

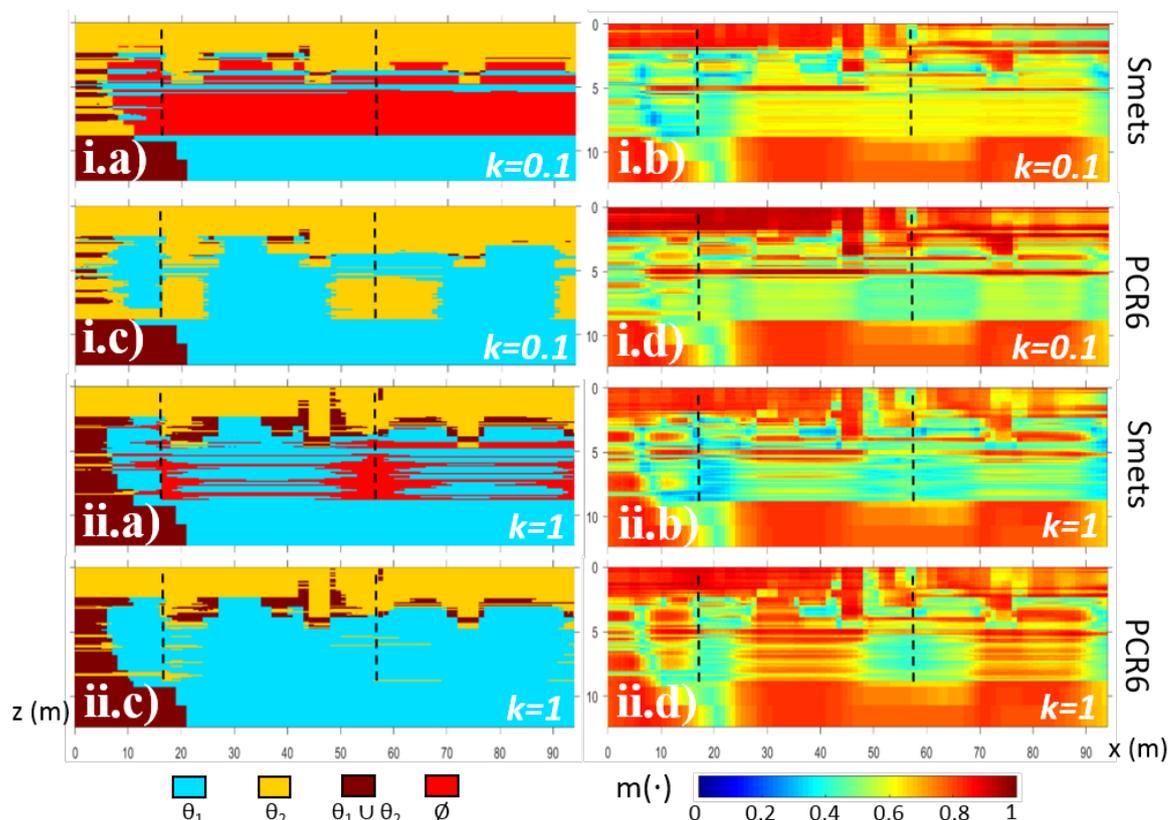


FIGURE V.20 – Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d) après combinaison des informations issues de la TRE et du CPT. Une valeur de  $k = 0.1$  est retenue pour les figures i) et une valeur de  $k = 1$  est retenue pour les figures ii). Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets et les figures (c, d) sont obtenues avec combinaison de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

Après normalisation, à l'aide de la règle de PCR6, l'hypothèse  $\theta_1$  devient majoritaire entre les sondages tandis que l'hypothèse  $\theta_2$  ressort à proximité des sondages (Figure V.20.i.c). La figure V.20.i.d souligne cependant le manque de confiance associé à ces résultats entre 5 et 9 m de profondeur.

Les résultats associés à la valeur de  $k = 1$  font transparaître moins de conflit (Figure V.20.ii.a). Cela est lié à une décroissance latérale plus rapide de la confiance associée à l'information géotechnique. Ainsi, après normalisation, l'hypothèse  $\theta_2$  de-

vient très rarement majoritaire au-delà de 5 m de profondeur et le niveau de confiance associé aux résultats inter-sondages (Figure V.20.ii.d) est plus élevé que pour une valeur de  $k$  plus faible (Figure V.20.i.d).

## 6.2 Fusion de données TRE et Essais de granulométrie

La Figure V.21 présente les résultats associés à la fusion d'informations provenant de l'acquisition géoélectrique ainsi que des analyses granulométriques, pour une valeur de  $k = 0.1$ , Figure V.21.i, et pour une valeur de  $k = 1$ , Figure V.21.ii.

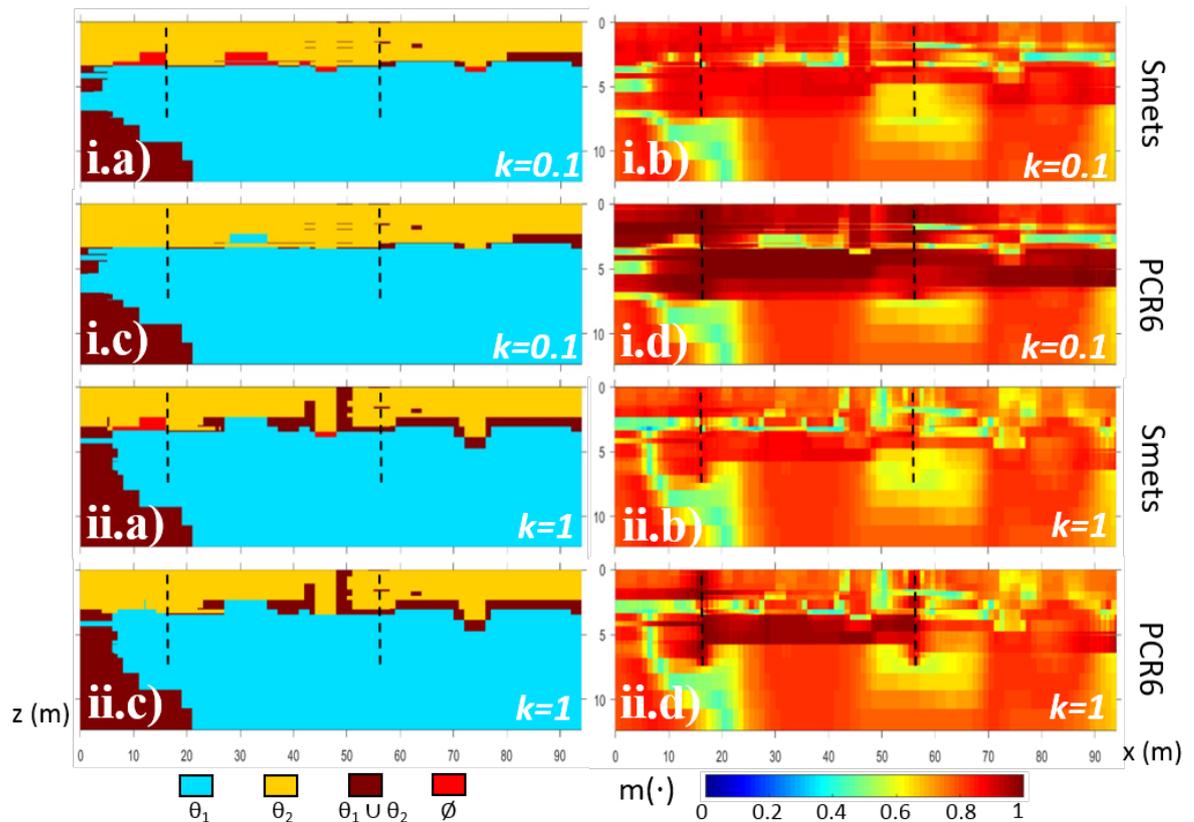


FIGURE V.21 – Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d) après combinaison des informations issues de la TRE et des analyses granulométriques. Une valeur de  $k = 0.1$  est retenue pour les figures i) et une valeur de  $k = 1$  est retenue pour les figures ii). Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets et les figures (c, d) sont obtenues avec combinaison de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

Le niveau de conflit entre les deux sources d'information est très faible, que ce soit pour une valeur de  $k = 0.1$  (Figure V.21.i.a) ou bien pour une valeur de  $k = 1$  (Figure V.21.ii.a). Ainsi, la confiance générale associée aux résultats est plus importante que la confiance qui était associée aux résultats géophysiques seuls (Figure V.13). La position de l'interface entre les deux ensembles lithologiques semble

également bien caractérisée (à environ 3.5 m de profondeur sous la position des électrodes). Cette caractérisation est cependant plus franche pour une valeur de  $k = 0.1$  (Figure V.21.i.c) que pour une valeur de  $k = 1$  (Figure V.21.ii.c). La caractérisation de l'interface est également plus franche sur la partie gauche de la section. Cela s'explique par l'absence d'information géotechnique, à une telle profondeur, au niveau du sondage n° 4, qui empêche une caractérisation aussi fiable sur la partie droite que sur la partie gauche.

La zone de grande confiance présente lors de la caractérisation géotechnique entre les sondages 2 et 3 (entre 4 et 6 m de profondeur) apparaît à l'issue de la fusion, tout comme les deux zones de moindre confiance qui apparaissaient dans la caractérisation géophysique (entre  $x = 48$  et  $x = 70$  m entre  $z = 5$  et  $z = 10$  m et entre  $x = 5$  et  $x = 25$  m et  $z = 4$  et  $z = 12$  m, Figure V.13). La fusion réalisée permet de lever plusieurs zones de doutes pour lesquelles, d'après la source géophysique seule, l'hypothèse incertaine  $\theta_1 \cup \theta_2$  était majoritaire.

### 6.3 Fusion de données issues des trois sources d'informations

Les Figure V.22 et V.23 présentent les résultats associés à la fusion d'informations provenant des trois sources d'informations considérées, pour une valeur de  $k = 0.1$ , Figure V.22, et pour une valeur de  $k = 1$ , Figure V.23.

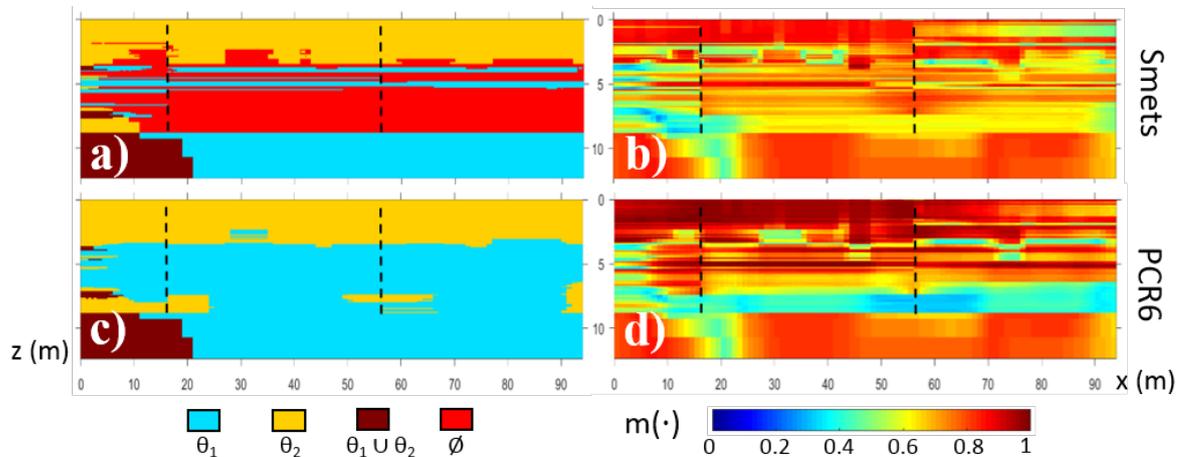


FIGURE V.22 – Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d) après combinaison des informations issues des trois sources d'information considérées. Une valeur de  $k = 0.1$  est retenue. Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets et les figures (c, d) sont obtenues avec la règle de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

Pour une valeur faible de  $k = 0.1$ , comme c'était le cas pour la fusion des informations issues de la TRE et du CPT (Figure V.20.i.a) le niveau de conflit est toujours très important pour la combinaison de 3 sources d'information (Figure V.22.a). En revanche, après normalisation (Figure V.22.c), l'occurrence de  $\theta_2$  est beaucoup moins

importante que ce qui apparaît Figure V.20.i.c. L'information issue des analyses granulométriques a en effet permis d'écarter une part non négligeable de cette hypothèse.

Le niveau de confiance général associé aux hypothèses représentées (Figure V.22.d) est intermédiaire aux valeurs présentées Figures V.20.d et V.21.d. Un niveau de confiance très faible demeure entre 7.40 et 8.80 m de profondeur. Ces profondeurs correspondent au niveau où des données CPT sont disponibles mais où aucun échantillon n'a pu être rapporté en laboratoire pour effectuer des analyses granulométriques. Il s'agit également de l'endroit où apparaît encore ponctuellement l'hypothèse  $\theta_2$  (Figure V.22.c) à proximité des sondages.

La position de l'interface entre les hypothèses  $\theta_1$  et  $\theta_2$  est mieux caractérisée que pour la fusion des simples données TRE + essais granulométriques (Figure V.21.c), y compris à droite du sondage n°3 ( $x = 56$  m). L'hypothèse incertaine  $\theta_1 \cup \theta_2$  ne transparait quasiment plus en-dehors d'une zone située au-delà de la profondeur d'investigation des méthodes de reconnaissance géotechniques.

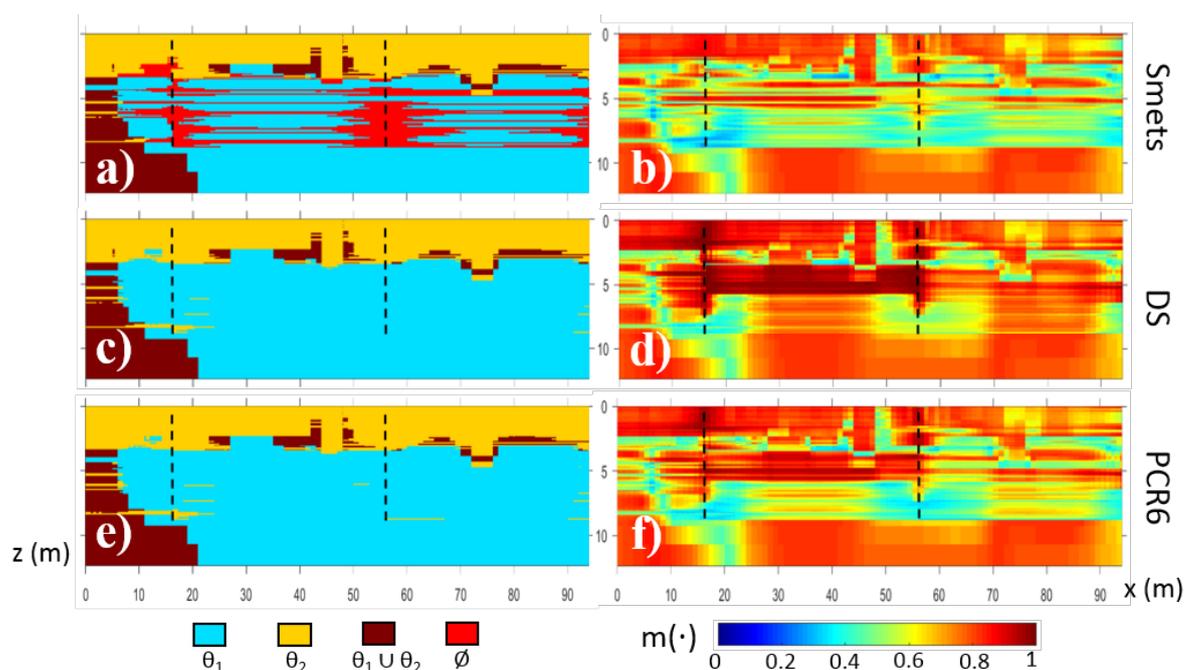


FIGURE V.23 – Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c, e) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d, f) après combinaison des informations issues des trois sources d'information considérées. Une valeur de  $k = 1$  est retenue. Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets, (c, d) avec la règle de Dempster-Shafer et les figures (e, f) sont obtenues avec la règle de PCR6. Les pointillés représentent la position des essais géotechniques.

Pour une valeur plus importante de  $k = 1$ , les valeurs de masses de croyance associées aux hypothèses majoritaires sont globalement plus faibles (Figures V.23.b et V.23.f). La quantité de conflit représentée est également moindre (Figure V.23.a).

Les positions des interfaces ne sont pas définies de manière aussi franche que pour une valeur de  $k = 0.1$  (Figure V.22) et une plus grande quantité d'incertitude subsiste, avec une plus grande occurrence de l'union des hypothèses :  $\theta_1 \cup \theta_2$  (Figure V.23.a, V.23.c, V.23.e). Ces résultats sont donc plus prudents mais permettent cependant de toujours mettre en avant la zone de grande confiance présente entre les sondages n° 2 ( $x = 16$  m) et n° 3 ( $x = 56$  m) entre 4 et 6 m de profondeur sous la ligne d'électrodes.

Si l'investigation sur site devait être renforcée dans le cadre de futures campagnes de reconnaissance, de tels résultats suggèrent un besoin d'informations supplémentaires entre  $x = 0$  et  $x = 10$  m à partir de 3 mètres de profondeur, là où l'union des hypothèses  $\theta_1 \cup \theta_2$  est majoritaire.

Les résultats proposés par la règle de combinaison de Dempster-Shafer (Figure V.23.c et V.23.d) sont très proches de ceux proposés par la règle de PCR6 (Figure V.23.e et V.23.f). Une confiance légèrement supérieure, accordée aux résultats issus de la règle de Dempster-Shafer, peut toutefois être observée.

#### 6.4 Discussion

Les résultats issus de la méthodologie de fusion suggèrent la présence d'une couche de matériau moins fin, sur environ 3.5 m d'épaisseur sous la ligne d'électrodes, et d'une couche de matériau plus fin sous-jacent. Il est possible d'associer la première couche au remblai (levée) et la seconde aux alluvions. Ces résultats sont en accord avec la représentation interne de l'ouvrage qui était proposée avant la mise en place de cette campagne de reconnaissance (Figure V.2).

L'essentiel du conflit présent dans les résultats est lié à la caractérisation faite par l'indice  $I_{SBT}$  à partir des données du CPT. Cette caractérisation considère essentiellement un matériau relativement grossier dans la quasi totalité de la digue contrairement à la TRE et à l'analyse granulométrique qui dissocient de façon assez claire deux grands ensembles. Il semblerait que la caractérisation des matériaux par l'indice  $I_{SBT}$  ne soit pas idéale dans le cas présent. C'est d'ailleurs pour cela qu'une masse de  $M(0) = 0.5$  est retenue au niveau des sondages CPT contrairement à une masse de  $M(0) = 0.99$  pour les analyses granulométriques. A l'avenir, il pourrait être pertinent de trouver un meilleur indice pour la caractérisation granulométrique des matériaux à partir des paramètres mesurés au CPT. Cependant, la fusion de trois sources, pour les deux valeurs de  $k$  considérées (Figures V.22 et V.23), permet de compenser de manière honorable cette information contradictoire tout en mettant en avant les zones de plus ou moins grande confiance.

Dans cette étude, la hauteur de nappe ainsi que ses variations ont été ignorées. Cependant, nous pensons que ce choix n'a pas d'impact conséquent sur les résultats proposés. Premièrement, les variations de niveau d'eau sont très faibles aux dates auxquelles a été menée la campagne de reconnaissance, il ne devrait donc pas y avoir de problème à considérer les données comme si elles avaient été acquises à un même instant  $t$ . Deuxièmement, la hauteur de nappe se situe au-delà de 8 m de profondeur

sous la surface, où des matériaux a priori argileux (faible résistivité) sont présents. La conductivité hydraulique de ces sols fins (alluvions) est sans doute très faible, leur état hydrique est potentiellement assez peu sensible aux variations saisonnières du niveau de la nappe. Cependant, il pourrait être pertinent, pour d'autres cas d'études, de tenir compte du niveau de nappe et de ses variations (particulièrement pour un suivi d'ouvrage sur une longue période et pour des campagnes de reconnaissance hivernales). Pour ce faire, il serait intéressant de considérer plus d'hypothèses au sein du cadre de discernement  $\Theta$  avec par exemple l'hypothèse  $\theta_1$  pouvant correspondre à un matériau fin à l'état sec et l'hypothèse  $\theta_2$  correspondant à ce même matériau mais à l'état hydrique saturé. Le nombre d'hypothèses constitutives de  $\Theta$  n'étant pas limité et ne nécessitant aucune modification à la démarche de travail. En revanche, le coût calculatoire pourrait potentiellement varier de manière significative.

Dans ce cas d'étude, l'utilisation d'une valeur neutre de  $k = 1$  (Figure V.23), sans trop d'a priori sur la variabilité horizontale du milieu, permet de proposer des résultats plus prudents avec des masses de croyance associées plus faibles ainsi que de laisser apparaître des zones d'incertitude (présence de  $\theta_1 \cup \theta_2$ ). Un « a priori » un peu plus fort sur le terrain, avec une valeur de  $k = 0.1$  (Figure V.22) permet en revanche de mieux localiser la position de l'interface horizontale entre les deux ensembles et de réduire les zones d'incertitude. Dans notre cas d'étude, l'hypothèse  $\theta_2$  devient alors localement majoritaire entre 7.40 et 8.80 m de profondeur (Figure V.22.c), mais les très faibles valeurs de masses de croyance associées à ces résultats nous incitent à les considérer avec précaution.

## 7 Conclusion

Dans cette deuxième partie, la méthodologie de fusion développée a été mise en œuvre pour combiner les informations issues de trois sources distinctes, présentées dans la première partie de ce chapitre. La fusion a pu être réalisée à la fois en considérant les sources d'informations deux à deux mais également en considérant les trois de manière conjointe.

Nous avons ainsi pu démontrer l'applicabilité de notre méthodologie à partir i) de véritables données, ii) pour plus de deux sources d'information, et iii) en considérant des classes de valeurs physiques associées à l'union de deux hypothèses du cadre de discernement.

Contrairement aux précédents chapitres, où nous avons connaissance du milieu investigué (modèles numériques ou modèle expérimental de laboratoire), nous n'avons pas ici connaissance de la **réalité complète** interne de l'ouvrage d'étude. Les résultats de fusion semblent cependant en accord avec la représentation qu'il était possible de se faire de l'ouvrage avant notre campagne de reconnaissance (Figure V.2).

Les résultats obtenus permettent de caractériser un ouvrage bicouche, composé de matériaux fins à partir de 3.50 m de profondeur sous la ligne d'électrodes, sur-

montés de matériaux moins fins. Il est possible d'associer la première couche au corps de la levée en remblai globalement désaturé et la seconde aux alluvions (potentiellement partiellement saturés). Les masses de croyance associées à ces résultats permettent de préciser les zones où la caractérisation est plus ou moins fiable et où l'investigation pourrait être renforcée.

Dans le cadre de futures campagnes de reconnaissance sur d'autres sites, il serait pertinent d'être en mesure de considérer la hauteur de nappe au sein de l'ouvrage ainsi que d'être capable de proposer d'autres indices fiables de caractérisation des sols à partir des paramètres CPT.

---

# Conclusion et perspectives

Afin de prévenir le risque de rupture de digues de protection contre les inondations et des désastres qui en découlent, le diagnostic de ces structures doit être renforcé. Pour ce faire, dans ce travail de thèse, nous avons proposé une méthodologie de fusion de l'information permettant de combiner quantitativement les informations acquises par méthodes d'investigations géophysiques et géotechniques lors des campagnes de reconnaissance. Cette méthodologie permet d'améliorer la caractérisation des ensembles lithologiques, en associant un indice de confiance aux résultats proposés, une quantification du niveau de conflit entre les sources, ainsi qu'en tenant compte des spécificités de chaque méthode de reconnaissance en termes d'imperfection associée aux données et de répartition spatiale de l'information. Nous reprenons et mettons en évidence ci-dessous les principaux apports de ces travaux de thèse, présentés au sein des 5 chapitres constitutifs du manuscrit.

## Apports de ces travaux de thèse

- Un important travail de recherches bibliographiques a été mené afin de souligner **les capacités de nombreuses méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques à caractériser des propriétés d'ouvrages hydrauliques potentiellement pathologiques**. Cette recherche permet de mettre en avant les méthodes d'investigation pertinentes à combiner en fonction des propriétés d'ouvrages à caractériser et des éventuelles pathologies recherchées.

- L'étude et la **comparaison de plusieurs modèles de combinaison de l'information** ont également été menées et ont mis en évidence l'intérêt de retenir le cadre de la théorie des masses de croyance pour répondre à notre problématique de travail.

- **Une nouvelle méthodologie de fusion d'informations** issues de sources géophysiques et géotechniques, à partir de trois règles de combinaison utilisées alternativement, a été développée. Cette méthodologie tient à la fois compte de la répartition spatiale de l'information, spécifique à chaque source, ainsi que des différents types d'imperfections associées aux données (incertitude, imprécision, incomplétude, inconsistance). Elle permet de mettre en évidence la répartition des ensembles lithologiques constitutifs de la section de sous-sol étudiée, tout en associant un indice de confiance aux résultats proposés (sous forme de masses de croyance). Nous avons pu mettre en avant la capacité de la méthodologie développée à localiser précisément

les positions des interfaces entre matériaux.

· **Plusieurs méthodes d'attribution de masses de croyance** géophysiques et géotechniques ont été proposées et comparées à partir de jeux de données simulées. Il est ainsi possible d'adapter la méthodologie de fusion en faisant varier les valeurs des paramètres  $k$  (coefficient de décroissance latérale de la confiance en l'information géotechnique) et  $M(0)$  (masse de croyance intrasonnage fixée sur l'hypothèse caractérisée) en fonction de la variabilité latérale du milieu et de la confiance qu'a l'expert dans la capacité de la méthode de reconnaissance géotechnique à caractériser le matériau investigué.

· La méthodologie développée est également opérationnelle **avec plus de deux sources d'information** (cf. Chapitre V) et est en capacité de travailler avec des masses de croyance non Bayésiennes. Ainsi, les sources d'information peuvent associer des masses de croyance à l'union d'hypothèses constitutives du cadre de discernement ( $\Theta$ ) et quantifier leur niveau d'incertitude. L'intérêt d'une telle considération est soulignée (cf. chapitre III) lorsqu'une des sources d'information est ignorante et dans l'incapacité de discriminer deux ensembles lithologiques, l'autre source d'information permet alors d'apporter la connaissance nécessaire à la distinction des formations lithologiques.

· Grâce à ce travail de thèse, nous avons pu mettre en avant la capacité de la méthodologie développée à caractériser une section d'étude **en fonction du nombre et de la position des investigations géotechniques** (cf. chapitre IV). La méthodologie permet également de **faire ressortir les zones de conflit** entre les sources d'information ainsi que les **zones de plus faible confiance**. Pour des applications futures, nous soulignons ici que ces informations seraient potentiellement précieuses lors de campagnes de reconnaissance sur site afin de savoir où les investigations doivent être renforcées. Enfin, notre méthodologie est en capacité de traiter des données géophysiques associées à **différents niveaux de bruit** sans que cela n'ait d'impact important sur les résultats post-fusion (cf. chapitre III).

· L'utilisation de la méthodologie à partir de données acquises sur un modèle expérimental, réalisé en laboratoire, ainsi que sur une véritable digue de protection fluviale a permis d'obtenir des résultats probants et encourageants quant à la capacité de la méthodologie à caractériser la répartition des ensembles lithologiques constitutifs des sous-sols.

Malgré les nombreux apports de ce travail qui viennent d'être relevés, la méthodologie développée n'est cependant pas exempte de **limites**. Afin de l'utiliser, il est notamment nécessaire d'être en capacité de relier une **valeur de paramètre physique** mesurée à un **type de matériau lithologique**. Si aucun lien ne peut être établi entre les deux, les masses de croyance ne peuvent être allouées sur les différentes hypothèses du cadre de discernement en amont du processus de fusion. De plus, pour employer la méthodologie proposée, **au moins deux sondages géotechniques sont requis**. Si un seul sondage est présent, la méthodologie, en l'état,

ne prévoit pas l'extension latérale de l'information géotechnique. Enfin, la méthode de calcul du coefficient de variation  $C_v$  à profondeur fixée entre deux sondages constitue une limite à la méthode, comme montré au Chapitre IV. Cette limite s'exprime lorsque la différence d'ordre de grandeur entre deux intervalles d'un paramètre géotechnique est trop importante.

## Perspectives

Ces travaux de thèse appellent à être poursuivis, approfondis et élargis. Ces travaux étant à la croisée de nombreux domaines de compétences (géophysique, géotechnique, modèles mathématiques de fusion, ouvrages hydrauliques...), il est possible d'améliorer et d'enrichir la méthodologie par de nombreux moyens (non exhaustifs) évoqués ci-dessous.

- Il serait d'abord souhaitable d'adapter la méthodologie de fusion à un **plus grand nombre de méthodes de reconnaissance géophysiques**. Dans ces travaux de thèse, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation de la méthode de TRE mais l'utilisation d'autres méthodes, ainsi que la combinaison d'informations géophysiques entre elles, pourrait être envisagée. Certaines méthodes de reconnaissance pourraient être plus facilement intégrables à la méthodologie que d'autres en fonction de la répartition spatiale de l'information. En effet, la difficulté de l'intégration d'une nouvelle méthode de reconnaissance géophysique ne provient pas des règles de combinaison mais de la discrétisation de la section de sous-sol, qui repose actuellement sur la grille obtenue à l'issue du processus d'inversion des résistivités.

- En termes de perspective de recherche, tout un travail pourrait être réalisé concernant l'amélioration de la qualité des résultats géophysiques obtenus à l'issue de l'inversion. L'**amélioration du résultat d'imagerie** devrait permettre d'obtenir un résultat post-fusion plus proche de la réalité de l'ouvrage.

- Il pourrait également être intéressant de considérer des **sections transversales** d'ouvrages plutôt que des sections longitudinales comme nous l'avons fait. Il serait alors nécessaire d'adapter la discrétisation de la section en incluant notamment les données de relevés topographiques. Il deviendrait aussi précieux de prendre en considération les **variations de hauteurs de nappes phréatiques** au sein de la section (grandes variations potentielles de hauteur d'eau entre le talus côté cours d'eau et le talus côté val).

- Des campagnes de reconnaissance proposant plusieurs profils d'acquisitions géophysiques ainsi que des points de sondages en-dehors de ces profils pourraient être menées afin d'adapter la méthodologie de fusion à une **représentation 3D d'ouvrage**. Cette adaptation nécessiterait une importante réflexion sur la décroissance spatiale de la confiance associée à l'information géotechnique depuis les sondages. Dans les cas présentés dans ce manuscrit, nous faisons l'hypothèse d'une répartition plutôt tabulaire des matériaux dans la longueur de la digue. Dans le cadre d'un modèle 3D, la décroissance de la confiance ne peut être considérée de la même manière

dans toutes les directions de l'espace.

· D'autres informations, autres que celles provenant des sources géotechniques et géophysiques, devraient pouvoir être prises en compte. Il serait par exemple opportun d'utiliser les probabilités subjectives et les procédés d'élicitation proposés par Vuillet (2012) afin que les **avis d'experts** puissent être intégrés pour quantifier le coefficient de décroissance latérale,  $k$ , et la distribution de masses de croyance affectée aux hypothèses du cadre de discernement au niveau des sondages,  $M(0)$ .

· Après avoir mené d'indispensables recherches bibliographiques sur les **méthodes de partitionnement**, il pourrait être judicieux d'y avoir recours pour suggérer de nouvelles méthodes de définitions de classes physiques à associer aux hypothèses de  $\Theta$  en amont de la fusion. Ces méthodes pourraient permettre d'automatiser le rattachement des données géophysiques et géotechniques aux hypothèses du cadre de discernement en fonction de leurs valeurs.

· A plus long terme, l'utilisation de **méthodes géostatistiques**, que nous avons volontairement laissées de côté dans ce travail, pourraient aussi être considérées pour générer des modèles de sous-sol à partir de données géotechniques éparses. Il faudrait cependant adapter la méthodologie pour allouer les masses de croyance sur les hypothèses du cadre de discernement, en tenant compte des niveaux d'imperfection des données.

· Enfin, en termes de perspective d'industrialisation, il serait appréciable que la méthodologie soit rendue **opérationnelle pour un usage sur site lors de campagnes de reconnaissance**. Elle pourrait alors être utilisée afin de visualiser les zones de plus faible confiance et de suggérer des emplacements pour les sondages à venir. Une telle utilisation permettrait l'optimisation des campagnes de reconnaissance, aussi bien sur un plan financier que sur un plan technique. L'utilisation de la méthodologie sur **un plus grand nombre d'ouvrages hydrauliques** serait finalement une perspective nécessaire afin de ne pas limiter la validation à un seul exemple (celui de St-Clément-des-Levées).

Pour conclure, cette méthodologie appliquée à la reconnaissance des ouvrages hydrauliques en terre serait parfaitement transposable à d'autres applications (glissements de terrain, pédologie, suivis de polluants, géotechnique routière, minier, pétrolier...), dès qu'au moins deux sources d'informations (géotechniques et géophysiques) sont en jeu.

---

# Bibliographie

- 11-300, A. N. P. (1992). Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- 94-052-1, A. N. P. (1995). Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination des Limites d'Atterberg - Partie 1 : Limite de Liquidité - Méthode du Cône de Pénétration.
- 94-056, A. N. P. (1996). Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.
- 94-113, A. N. P. (1996). Sols : reconnaissance et essais - Essai de pénétration statique.
- Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., and Blotz, L. R. (1996). Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5) :397–406.
- Ahmed, A. S., Jardani, A., Revil, A., and Dupont, J.-P. (2013). SP2dinv : A 2d forward and inverse code for streaming potential problems. *Computers & Geosciences*, 59 :9–16.
- Al-Saigh, N. H., Mohammed, Z. S., and Dahham, M. S. (1994). Detection of water leakage from dams by self-potential method. *Engineering Geology*, 37(2) :115–121.
- Alumbaugh, D. L. and Newman, G. A. (2000). Image appraisal for 2-D and 3-D electromagnetic inversion. *Geophysics*, 65(5) :1455–1467.
- Alvin, D. R., Nielsen, O. F., and Sorensen, C. S. (2016). An integrated approach to geotechnics and geophysics on the electrification programme in Denmark. Reykjavik.
- Alyamani, M. S. and Şen, Z. (1993). Determination of Hydraulic Conductivity from Complete Grain-Size Distribution Curves. *Groundwater*, 31(4) :551–555.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., and Das, B. M. (2016). *Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering*. Springer.
- Anbazhagan, P., Sitharam, T. G., and Vipin, K. S. (2009). Site classification and estimation of surface level seismic hazard using geophysical data and probabilistic approach. *Journal of Applied Geophysics*, 68(2) :219–230.

- Annan, A. P. (2005). Ground-penetrating radar. In *Near-surface geophysics*, pages 357–438. Society of Exploration Geophysicists.
- Antoine, R., Fauchard, C., Fargier, Y., and Durand, E. (2015). Detection of leakage areas in an earth embankment from GPR measurements and permeability logging. *International Journal of Geophysics*, 2015.
- Araujo, S., Delbreilh, L., Laguerre, L., Dumont, H., Dargent, E., and Fauchard, C. (2016). Rock permittivity characterization and application of electromagnetic mixing models for density/compactness assessment of HMA by means of step-frequency radar. *Near Surface Geophysics*, 14(6) :551–562.
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01) :54–62.
- Armbruster, H., Blinde, A., Brauns, J., Döscher, H. D., Hötzl, H., and Merkler, G. P. (1989). The application of geoelectrical and thermal measurements to locate dam leakages. In *Detection of Subsurface Flow Phenomena*, pages 31–47. Springer.
- ASTM (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. Technical Report D2216-10, West Conshohocken.
- ASTM (2011a). Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Sub-surface Investigation. Technical Report D5777-00, West Conshohocken.
- ASTM (2011b). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. Technical Report D4767-11, West Conshohocken.
- ASTM (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). Technical Report D698-12e2, West Conshohocken.
- ASTM (2014). Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay. Technical Report C837-09(2014), West Conshohocken.
- ASTM (2015a). Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils. Technical Report D2573/D2573M-15, West Conshohocken.
- ASTM (2015b). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall. Technical Report D5856-15, West Conshohocken.
- ASTM (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. Technical Report D2166/D2166M-16, West Conshohocken.
- ASTM (2017a). Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. Technical Report C29/C29M-17a, West Conshohocken.

- ASTM (2017b). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. Technical Report D7928-17, West Conshohocken.
- ASTM (2017c). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Technical Report D4318-17, West Conshohocken.
- ASTM (2017d). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. Technical Report D6913/D6913M-17, West Conshohocken.
- Azzouz, A. S., Baligh, M. M., and Ladd, C. C. (1983). Corrected field vane strength for embankment design. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(5) :730–734.
- Baghdad, Z. A., Ghazali, F. M., and Al-Ahmadi, S. (1993). Cone Penetration Testing For Field Density Prediction. *Engineering Journal of Qatar University*, 6 :135–156.
- Baltassat, J. M. and Legchenko, A. (2003). Etalonnage des résultats des sondages de Résonance Magnétique protonique (RMP) avec des données hydrodynamiques, méthodologie mise au point à partir de divers sites de forages hydrogéologiques en Eure-et-Loir dans le Vaucluse et dans la Vienne. Technical report, BRGM/RP-52247-FR.
- Beck, Y.-L., Lopes, S. P., Ferber, V., and Côte, P. (2011). Microstructural Interpretation of Water Content and Dry Density Influence on the DC-Electrical Resistivity of a Fine-Grained Soil. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6) :694–707.
- Beguin, R. (2011). *Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre*. PhD thesis, Grenoble.
- Beguin, R., Fry, J.-J., Picault, C., Courivaud, J.-R., Faure, Y.-H., and Philippe, P. (2012). Control of the risk of dike failure caused by contact erosion. In *Proc. 6th International Conference on Scour and Erosion*, pages 1551–1558.
- Behroozmand, A. A., Keating, K., and Auken, E. (2015). A review of the principles and applications of the NMR technique for near-surface characterization. *Surveys in Geophysics*, 36(1) :27–85.
- Bélanger, C., Giroux, B., Gloaguen, E., and Lefebvre, R. (2010). GPR, ERT and CPT data integration for high resolution aquifer modeling. In *Ground Penetrating Radar (GPR), 2010 13th International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- Bell, F. G. (2007). *Engineering Geology*. Butterworth-Heinemann. Google-Books-ID : Izm6IUVDcUC.
- Benahmed, N. and Bonelli, S. (2012). Investigating concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing hole erosion tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(1) :43–58.

- 
- Benedetto, A. and Pajewski, L. (2015). *Civil engineering applications of ground penetrating radar*. Springer.
- Bertil, D. (2007). Réalisation et instrumentation d'un sondage en Guadeloupe pour l'étude de la liquéfaction. Technical Report RP-55624-FR, BRGM.
- Besson, A., Cousin, I., Dorigny, A., Dabas, M., and King, D. (2008). The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples : Analysis of the existing conversion models and proposal of a new model. *Soil Science*, 173(10) :707–720.
- Biavati, G., Ghirotti, M., Mazzini, E., Mori, G., and Todini, E. (2008). The use of GPR for the detection of non-homogeneities in the Reno River embankments (North-Eastern Italy). In *4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management, Université Laval, Québec, Canada*, pages 20–24.
- Bièvre, G., Lacroix, P., Oxarango, L., Goutaland, D., Monnot, G., and Fargier, Y. (2017). Integration of geotechnical and geophysical techniques for the characterization of a small earth-filled canal dyke and the localization of water leakage. *Journal of Applied Geophysics*, 139 :1–15.
- Bièvre, G. and Maurin, P. (2002). Evaluation of a geological radar at the LCPC geophysical test site in Nantes, France. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*.
- Bièvre, G., Oxarango, L., Günther, T., Goutaland, D., and Massardi, M. (2018). Improvement of 2d ERT measurements conducted along a small earth-filled dyke using 3d topographic data and 3d computation of geometric factors. *Journal of Applied Geophysics*, 153 :100–112.
- Binley, A. and Kemna, A. (2005). DC resistivity and induced polarization methods. In *Hydrogeophysics*, pages 129–156. Springer.
- Bitri, A., Samyn, K., and Filippi, C. (2016). Can We Really Detect Cavities Using Seismic Surface Wave ? In *Near Surface Geoscience 2016-22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Bjerrum, L. (1972). Embankments on soft ground. In *Proc. Specialty Conference on Performance of Earth-Supported Structures*, volume 2, pages 1–54.
- Blížkovský, M. (1979). Processing and applications in microgravity surveys. *Geophysical Prospecting*, 27(4) :848–861.
- Bloch, I. (2003). Fusion d'informations en traitement du signal et des images. *Hermès Science Publication*, 2.
- Bloch, I. (2005). Fusion d'informations numériques : panorama méthodologique. page 10.
- Boaga, J. (2017). The use of FDEM in hydrogeophysics : A review. *Journal of Applied Geophysics*, 139 :36–46.

- 
- Bohlen, T., Kugler, S., Klein, G., and Theilen, F. (2004). 1.5 D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion. *Geophysics*, 69(2) :330–344.
- Bolève, A. (2009). *Localisation et quantification des zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané*. PhD thesis, Université de Savoie.
- Bolève, A., Janod, F., Revil, A., Lafon, A., and Fry, J.-J. (2011). Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection. *Journal of Hydrology*, 403(3) :242–252.
- Bolève, A., Revil, A., Janod, F., Mattiuzzo, J. L., and Fry, J.-J. (2009). Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. *Near Surface Geophysics*, 7(5-6) :447–462.
- Bolève, A., Vandemeulebrouck, J., and Grangeon, J. (2012). Dyke leakage localization and hydraulic permeability estimation through self-potential and hydro-acoustic measurements : Self-potential 'abacus' diagram for hydraulic permeability estimation and uncertainty computation. *Journal of Applied Geophysics*, 86 :17–28.
- Bonelli, S. and Brivois, O. (2008). The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 32(13) :1573–1595.
- Bonelli, S., Courivaud, J.-R., Duchesne, L., Fry, J.-J., and Royet, P. (2012). Internal erosion on dams and dikes : lessons from experience and modelling. Kyoto, Japan.
- Boonstra, R., Krebs, C. J., Boutin, S., and Eadie, J. M. (1994). Finding mammals using far-infrared thermal imaging. *Journal of mammalogy*, 75(4) :1063–1068.
- Boschetti, F., Dentith, M. C., and List, R. D. (1996). Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms. *Geophysics*, 61(6) :1715–1727.
- Bouchon-Meunier, B. (1995). *La logique floue et ses applications*.
- Bouchon-Meunier, B. and Marsala, C. (2003). *Logique floue : principes, aide à la décision*. Hermes-Lavoisier.
- Bárdossy, A. and Samaniego, L. (2002). Fuzzy rule-based classification of remotely sensed imagery. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 40(2) :362–374.
- Brevik, E. C., Fenton, T. E., and Lazari, A. (2006). Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture*, 7(6) :393–404.
- Brierley, G. J., Ferguson, R. J., and Woolfe, K. J. (1997). What is a fluvial levee? *Sedimentary Geology*, 114(1-4) :1–9.

- 
- Burns, B., Barker, R., and Ghataora, G. S. (2006). Investigating internal erosion using a miniature resistivity array. *NDT & E International*, 39(2) :169–174.
- Busato, L., Boaga, J., Peruzzo, L., Himi, M., Cola, S., Bersan, S., and Cassiani, G. (2016). Combined geophysical surveys for the characterization of a reconstructed river embankment. *Engineering Geology*, 211 :74–84.
- Butler, D. K. (1980). Microgravimetric techniques for geotechnical applications. Technical report, Army engineer waterways experiment station Vicksburg ms geotechnical lab.
- Butler, D. K. (1984). Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 49(7) :1084–1096.
- Butler, J., Roper, T. J., and Clark, A. J. (1994). Investigation of badger (Meles meles) setts using soil resistivity measurements. *Journal of Zoology*, 232(3) :409–418.
- Cailleux, J.-B. (1986). *étude des diagraphies instantanées en forage*. Ministère de l’urbanisme, du logement et des transports, Laboratoire central des ponts et chaussées.
- Calamita, G., Perrone, A., Brocca, L., Onorati, B., and Manfreda, S. (2015). Field test of a multi-frequency electromagnetic induction sensor for soil moisture monitoring in southern Italy test sites. *Journal of Hydrology*, 529 :316–329.
- Cardarelli, E., Cercato, M., and De Donno, G. (2014). Characterization of an earth-filled dam through the combined use of electrical resistivity tomography, P-and SH-wave seismic tomography and surface wave data. *Journal of Applied Geophysics*, 106 :87–95.
- Carlsten, S., Johansson, S., and Wörman, A. (1995). Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams. *Journal of applied geophysics*, 33(1-3) :143–156.
- Carman, P. C. (1956). *Flow of gases through porous media*. Academic press.
- Carranza, E. J. M. and Hale, M. (2003). Evidential belief functions for data-driven geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. *Ore Geology Reviews*, 22(1-2) :117–132.
- Cassan, M. (2005). Les essais pressiométriques et leurs applications en France, rappels historiques et état des connaissances, ISP5-PRESSIO 2005. *Gambin, Magnan and Mestat (ed), LCPC, Paris*, pages 125–200.
- Castermant, J., Mendonça, C. A., Revil, A., Trolard, F., Bourrié, G., and Linde, N. (2008). Redox potential distribution inferred from self-potential measurements associated with the corrosion of a burden metallic body. *Geophysical Prospecting*, 56(2) :269–282.

- 
- CEPRI (2011). La gestion des digues de protection contre les inondations. Technical report, Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation.
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., and Bosch, F. P. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration : an overview. *Hydrogeology Journal*, 19(6) :1169.
- Chandler, R. J. (1988). The in-situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane. In *Vane shear strength testing in soils : field and laboratory studies*. ASTM International.
- Chang, D., Vinegar, H. J., Morriss, C., Straley, C., and others (1994). Effective porosity, producible fluid and permeability in carbonates from NMR logging. In *SPWLA 35th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Chapuis, R. P. (1989). Shape factors for permeability tests in boreholes and piezometers. *Groundwater*, 27(5) :647–654.
- Chevalier, C. and Bonelli, S. (2017). *Méthodologie de caractérisation expérimentale*. Presses des Ponts : Publications IREX, Paris.
- Chinedu, A. D. and Ogah, A. J. (2013). Electrical resistivity imaging of suspected seepage channels in an earthen dam in Zaria, North-Western Nigeria. *Open Journal of Applied Sciences*, 3(01) :145.
- Chlaib, H. K., Mahdi, H., Al-Shukri, H., Su, M. M., Catakli, A., and Abd, N. (2014). Using ground penetrating radar in levee assessment to detect small scale animal burrows. *Journal of Applied Geophysics*, 103(Supplement C) :121–131.
- Christensen, C. W., Pfaffhuber, A. A., Anschütz, H., and Smaavik, T. F. (2015). Combining airborne electromagnetic and geotechnical data for automated depth to bedrock tracking. *Journal of Applied Geophysics*, 119 :178–191.
- Cockx, L., Van Meirvenne, M., and De Vos, B. (2007). Using the EM38dd soil sensor to delineate clay lenses in a sandy forest soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4).
- Cooke, R. (1991). *Experts in uncertainty : opinion and subjective probability in science*. Oxford University Press on Demand.
- Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y. J., Tabbagh, A., and Charlery, Y. (2006). Correlations between geotechnical and electrical data : A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, 60(3) :165–178.
- Curt, C., Talon, A., and Mauris, G. (2008). Using physical measurements, sensory evaluations and expert judgments in a dam assessment support system. In *12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement, Annecy, France*, pages 03–05.

- Cygal, A., Pilch, J., Stefaniuk, M., and Mackowski, T. (2016). Application of Joint Inversion of Seismic and Gravity Data for Geological Characterization of Near Surface Zone. In *Near Surface Geoscience 2016-22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Da Fonseca, A. V., Carvalho, J., Ferreira, C., Santos, J. A., Almeida, F., Pereira, E., Feliciano, J., Grade, J., and Oliveira, A. (2006). Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(5) :1307–1348.
- Daniels, D. J. (2005). *Ground penetrating radar*. Wiley Online Library.
- Danka, J. and Zhang, L. M. (2015). Dike failure mechanisms and breaching parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9) :04015039.
- De Finetti, B. (1937). La prévision : ses lois logiques, ses sources subjectives. In *Annales de l'institut Henri Poincaré*, volume 7, pages 1–68.
- Debeglia, N., Bitri, A., and Thierry, P. (2006). Karst investigations using microgravity and MASW ; Application to Orléans, France. *Near Surface Geophysics*, 4(4) :215–225.
- Debeglia, N. and Dupont, F. (2002). Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 50(4) :435–454.
- Deitchman, R. S. and Loheide, S. P. (2009). Ground-based thermal imaging of groundwater flow processes at the seepage face. *Geophysical Research Letters*, 36(14).
- Delefortrie, S., De Smedt, P., Saey, T., Van De Vijver, E., and Van Meirvenne, M. (2014). An efficient calibration procedure for correction of drift in EMI survey data. *Journal of Applied Geophysics*, 110 :115–125.
- Dempster, A. P. (1967). Upper and lower probability inferences based on a sample from a finite univariate population. *Biometrika*, 54(3-4) :515–528.
- Dérobot, X. and Abraham, O. (2000). GPR and seismic imaging in a gypsum quarry. *Journal of Applied Geophysics*, 45(3) :157–169.
- Dezert, T., Fargier, Y., Lopes, S. P., and Cote, P. (2018a). Application of Belief Functions to Levee Assessment. In *International Conference on Belief Functions*, pages 73–76. Springer.
- Dezert, T., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., and Cote, P. (2018b). Fusion de données géophysiques et géotechniques par l'utilisation des fonctions de croyance. In *11ème colloque Geofcan 2018*.

- 
- Dezert, T., Fargier, Y., Palma Lopes, S., and Côte, P. (2019a). Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : A review. *Engineering Geology*, page 105206.
- Dezert, T., Lopes, S. P., Fargier, Y., and Cote, P. (2018c). Geophysical and Geotechnical Data Fusion for Levee Assessment-Interface Detection with Biased Geophysical Data. In *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Dezert, T., Lopes, S. P., Fargier, Y., and Côte, P. (2019b). Combination of geophysical and geotechnical data using belief functions : Assessment with numerical and laboratory data. *Journal of Applied Geophysics*, 170 :103824.
- Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., and Cote, P. (2019c). Levee Characterization by Means of Data Fusion of In-Situ Geophysical and Geotechnical Information. In *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Dezert, T., Palma-Lopes, S., Fargier, Y., Côte, P., and Jodry, C. (2017). A New Database Structure Guiding the Combination of Geophysical and Geotechnical Methods for Levee Investigation. In *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Dezert, T., Palma-Lopes, S., Fargier, Y., Forquenot de la Fortelle, Q., Cote, P., and Tourment, R. (2019d). Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues. In *Digues 2019*, Aix en Provence.
- Di Prinzio, M., Bittelli, M., Castellarin, A., and Pisa, P. R. (2010). Application of GPR to the monitoring of river embankments. *Journal of Applied Geophysics*, 71(2) :53–61.
- Dion, R. (1961). *Histoire des levées de la Loire*. Paris, flammarion edition.
- Doolittle, J. A., Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., and Indorante, S. J. (1994). Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(6) :572–575.
- Dornstädter, J. and Heinemann, B. (2012). Temperature as tracer for in situ detection for internal erosion. In *Proceedings of the international conference on scour and erosion-6, Paris*.
- Dubois, D. and Prade, H. (1980). Systems of linear fuzzy constraints. *Fuzzy sets and systems*, 3(1) :37–48.
- Dubois, D. and Prade, H. (2006). Représentations formelles de l'incertain et de l'imprécis. *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision*, 1 :11–165.
- Dubois, D. and Prade, H. (2008). A set-theoretic view of belief functions. In *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*, pages 375–410. Springer.

- 
- Dubois, D. and Prade, M. (1985). *The Theory of Possibility (Théorie des possibilités)*. Masson, Paris.
- Dubois, E. and Prade, H. M. (2000). *The handbook of fuzzy sets volume 7 : fundamentals of fuzzy sets*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
- Duchamp, J.-M. (1988). *Apport des techniques statistiques pour l'exploitation des diagaphies instantanées en génie civil*. PhD thesis.
- Durieu, C., Aldon, M.-J., and Meizel, D. (1996). Multisensory data fusion for localisation in mobile robotics. *Traitement du signal*, 13(2) :143–166.
- Eaton, G. P. and Watkins, J. S. (1967). The use of seismic refraction and gravity methods in hydrogeological investigations. *Mining and groundwater geophysics*, 26 :544–568.
- Everett, M. E. (2012). Theoretical developments in electromagnetic induction geophysics with selected applications in the near surface. *Surveys in geophysics*, 33(1) :29–63.
- Fahey, M. (2005). Stiffness of sands of different ages from pressuremeter and seismic cone tests in Perth. In *International Symposium Pressio*, volume 1, pages 611–619.
- Fargier, Y. (2011). *Développement de l'Imagerie de Résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Fargier, Y., Durand, E., and Rousselet, R. (2013). Le Perméafor, un outil de diagnostic des ouvrages hydrauliques en terre et de leur fondation. In *Colloque CFBR Modernisation des barrages, Thème*, volume 2, pages 133–141.
- Fargier, Y., Lopes, S. P., Fauchard, C., François, D., and Côte, P. (2014). DC-Electrical Resistivity Imaging for embankment dike investigation : A 3d extended normalisation approach. *Journal of Applied Geophysics*, 103 :245–256.
- Fattahi, S. M., Soroush, A., and Shourijeh, P. T. (2017). The Hole Erosion Test : A Comparison of Interpretation Methods. *Geotechnical Testing Journal*, 40(3) :494–505.
- Fauchard, C. and Mériaux, P. (2007). *Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes : Guide for implementation and interpretation*. Quae.
- Fauchard, C., Potherat, P., Cote, P., and Mudet, M. (2004). Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. *Guide technique- Laboratoire central des ponts et chaussées*.
- Fawaz, A., Farah, E., and Hagechegade, F. (2014). Etude et relation entre les modules pressiométrique et élastique du sol. Beauvais, France.

- 
- Fell, R. and Fry, J. J. (2007). *Internal Erosion of Dams and Their Foundations : Selected and Reviewed Papers from the Workshop on Internal Erosion and Piping of Dams and Their Foundations, Aussois, France, 25-27 April 2005*. Taylor & Francis Group.
- Fink, J. B., McAlister, E. O., Sternberg, B. K., Wieduwilt, W. G., and Ward, S. H. (1990). *Induced Polarization Applications and Case Histories*. Society of Exploration Geophysicists.
- Flavigny, E., Desrues, J., and Palayer, B. (1990). Note technique : le sable d'Hostun « RF ». *Revue française de géotechnique*, (53) :67–70.
- Forquenot de la Fortelle, Q. (2018). Réalisation d'un modèle réduit pour la fusion de données géophysiques et géotechniques. Technical report, MINES ParisTech, Ifsttar Nantes.
- Foster, M., Fell, R., and Spannagle, M. (2000a). A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5) :1025–1061.
- Foster, M., Fell, R., and Spannagle, M. (2000b). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5) :1000–1024.
- François, D., Mériaux, P., and Monnet, J. (2016). *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*. Presses des Ponts : Publications IREX, Paris. OCLC : 966418274.
- Friedman, S. P. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity : a review. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1) :45–70.
- Fry, J. (2012). Introduction to the process of internal erosion in hydraulic structures : embankment dams and dikes. *Erosion of geomaterials*, pages 1–37.
- Gallardo, L. A. and Meju, M. A. (2003). Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2d inversion of dc resistivity and seismic data. *Geophysical Research Letters*, 30(13).
- Gallardo, L. A. and Meju, M. A. (2004). Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 109(B3).
- Gaussorgues, G. (1999). *La thermographie infrarouge : principes-techniques-applications, Quatrième édition revue et argumentée*. ISBN.
- Gautam, P., Pant, S. R., and Ando, H. (2000). Mapping of subsurface karst structure with gamma ray and electrical resistivity profiles : a case study from Pokhara valley, central Nepal. *Journal of Applied Geophysics*, 45(2) :97–110.

- Ghorbani, A., Cosenza, P., Revil, A., Zamora, M., Schmutz, M., Florsch, N., and Jougnot, D. (2009). Non-invasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using spectral induced polarization : A laboratory investigation. *Applied Clay Science*, 43(3) :493–502.
- Giao, P. H., Chung, S. G., Kim, D. Y., and Tanaka, H. (2003). Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 52(4) :157–175.
- Giao, P. H., Dung, N. T., and Long, P. V. (2008). An integrated geotechnical-geophysical investigation of soft clay at a coastal site in the Mekong Delta for oil and gas infrastructure development. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(11) :1514–1524.
- Girard, H., Morlier, P., Puvilland, O., and Garzon, M. (1986). The digital ENPASOL method-exploitation of drilling parameters in civil engineering. In *Proc., 39th Canadian Geotechnical Conf*, pages 59–68.
- Golebiowski, T. (2010). Velocity analysis in the GPR method for loose-zones detection in the river embankments. In *Ground Penetrating Radar (GPR), 2010 13th International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- Gong, W., Wang, L., Khoshnevisan, S., Juang, C. H., Huang, H., and Zhang, J. (2014). Robust geotechnical design of earth slopes using fuzzy sets. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1) :04014084.
- Grandjean, G., Malet, J.-P., Bitri, A., and Méric, O. (2007). Geophysical data fusion by fuzzy logic for imaging the mechanical behaviour of mudslides. *Bulletin de la société géologique de France*, 178(2) :127–136.
- Grasmueck, M. (1996). 3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss. *Geophysics*, 61(4) :1050–1064.
- Gregoire, N. and Bouillot, M. (1998). Hausdorff distance between convex polygons. *Computational Geometry Web project*.
- Grinzato, E., Ludwig, N., Cadelano, G., Bertucci, M., Gargano, M., and Bison, P. (2011). Infrared thermography for moisture detection : a laboratory study and in-situ test. *Materials Evaluation*, 69(1) :97–104.
- Grunewald, E. and Knight, R. (2011). The effect of pore size and magnetic susceptibility on the surface NMR relaxation parameter T 2. *Near Surface Geophysics*, 9(2) :169–178.
- Gui, M. W., Soga, K., Bolton, M. D., and Hamelin, J. P. (2002). Instrumented borehole drilling for subsurface investigation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128(4) :283–291.

- Guidoux, C., Faure, Y.-H., Beguin, R., and Ho, C.-C. (2009). Contact erosion at the interface between granular coarse soil and various base soils under tangential flow condition. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(5) :741–750.
- Gunn, D. A., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Dijkstra, T. A., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., and others (2015). Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials*, 92 :82–94.
- Haeni, F. P. (1988). *Application of seismic-refraction techniques to hydrologic studies*. US Government Printing Office.
- Hagedoorn, J. G. (1959). The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical prospecting*, 7(2) :158–182.
- Hanson, B. R. and Kaita, K. (1997). Response of electromagnetic conductivity meter to soil salinity and soil-water content. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(2) :141–143.
- Hazen, A. (1893). Some physical properties of sands and gravels with special reference to their filtration. Lawrence, Mass. *24th Annual Report of the State Board of Health of Massachusetts for*.
- Hegazy, Y. A. and Mayne, P. W. (2002). Objective site characterization using clustering of piezocone data. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(12) :986–996.
- Heiland, C. A. (1940). Geophysical investigations concerning the seismic resistance of earth dams. *Geophysical Prospecting*, page 350.
- Helton, J. C. (1997). Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57(1-4) :3–76.
- Henensal, P. and Duchatel, F. (1990). L'érodimètre à jets mobiles. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 167 :47–52.
- Herrier, G., Leconte, P., Nerinx, N., Bonelli, S., Mercier, F., Fry, J.-J., Tachker, P., and Puiatti, D. (2014). Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures : State of the art and presentation of the French DigueElite project. In *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*. Rostock, volume 10, page 12.
- Hertrich, M. (2008). Imaging of groundwater with nuclear magnetic resonance. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 53(4) :227–248.
- Hervé, S. and Bénot, R. (2013). Digue de la Loire à St Clément des Levées (49) : Suivi par méthodes géophysiques, Comptendu des mesures 2012. Technical Report Opération 11R103 DOFEAS, IFSTTAR.

- 
- Hilbich, C. (2010). Time-lapse refraction seismic tomography for the detection of ground ice degradation. *The Cryosphere*, 4(3) :243.
- Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the national academy of sciences*, 79(8) :2554–2558.
- Huang, Y., Fipps, G., Maas, S. J., and Fletcher, R. S. (2010). Airborne remote sensing for detection of irrigation canal leakage. *Irrigation and Drainage*, 59(5) :524–534.
- Hughes, J. M. O., Wroth, C. P., and Windle, D. (1977). Pressuremeter tests in sands. *Geotechnique*, 27(4) :455–477.
- Huiming, C., Honghai, X., and Xu, Y. (1990). Detecting underground cables and metal conducting pipes by using EM methods. *Geotechnical and environmental geophysics, III : Geotechnical. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa*, pages 229–237.
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., and Annan, A. P. (2003). Measuring soil water content with ground penetrating radar. *Vadose zone journal*, 2(4) :476–491.
- Huntley, D. (1986). Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers. *Groundwater*, 24(4) :466–474.
- Hupin, D. and Hervé, S. (2009). Projet ERINOH - Instrumentation d'un corps de digue par panneaux électriques. Technical Report Opération 11N072, LCPC.
- Hvorslev, M. J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations. *Geotechnical Special Publicaiton*, 36(118).
- Inazaki, T. and Hayashi, K. (2011). Utilization of integrated geophysical surveying for the safety assessment of levee systems. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2011*, pages 370–378. Society of Exploration Geophysicists.
- Inazaki, T. and Sakamoto, T. (2005). Geotechnical characterization of levee by integrated geophysical surveying. In *Proceedings of the International Symposium on Dam Safety and Detection of Hidden Troubles of Dams and Dikes*.
- Ingham, M., Joseph, S., Ilse, K., and Gouws, G. (2014). IP and SIP - the practical link? pages 14–15, Oléron Island, France.
- Irons, T., Quinn, M. C., Li, Y., and McKenna, J. R. (2014). A numerical assessment of the use of surface nuclear magnetic resonance to monitor internal erosion and piping in earthen embankments. *Near Surface Geophysics*, 12(2) :325–334.
- ISO (2012a). Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1 : Electrical cone and piezocone penetration test. Technical Report 22476-1 :2012.

- 
- ISO (2012b). Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 4 : Ménard pressuremeter test. Technical Report 22476-4 :2012.
- ISO (2017a). Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 10 : Direct shear tests. Technical Report 22476-10 :2012.
- ISO (2017b). Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 5 : Incremental loading oedometer test. Technical Report 17892-5 :2017.
- Jamiolkowski, M. (1985). New development in field and laboratory testing of soils. In *Proc. 11th ICSMFE*, volume 1, pages 57–153.
- Jardani, A., Revil, A., and Dupont, J. P. (2006). Self-potential tomography applied to the determination of cavities. *Geophysical Research Letters*, 33(13).
- Jardani, A., Revil, A., Santos, F., Fauchard, C., and Dupont, J. P. (2007). Detection of preferential infiltration pathways in sinkholes using joint inversion of self-potential and EM-34 conductivity data. *Geophysical Prospecting*, 55(5) :749–760.
- Jewell, R. J., Fahey, M., and Wroth, C. P. (1980). Laboratory studies of the pressuremeter test in sand. *Geotechnique*, 30(4) :507–531.
- Jia, G. W., Zhan, T. L., Chen, Y. M., and Fredlund, D. G. (2009). Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels. *Engineering Geology*, 106(1) :92–103.
- Jodry, C., Lopes, S. P., Fargier, Y., Sanchez, M., and Côte, P. (2019). 2d-ERT monitoring of soil moisture seasonal behaviour in a river levee : A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 167 :140–151.
- Johansson, S. and Dahlin, T. (1996). Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements. *European Journal of Engineering and Geophysics*, 1 :229–247.
- Jol, H. M. (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier Science Ltd.
- Jones, G., Sentenac, P., and Zielinski, M. (2014). Desiccation cracking detection using 2-D and 3-D Electrical Resistivity Tomography : Validation on a flood embankment. *Journal of Applied Geophysics*, 106 :196–211.
- Jouniaux, L., Maineult, A., Naudet, V., Pessel, M., and Sailhac, P. (2009). Review of self-potential methods in hydrogeophysics. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(10) :928–936.
- Kachanoski, R. G., Wesenbeeck, I. V., and Jong, E. D. (1990). Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electrical conductivity. *Canadian Journal of Soil Science*, 70(3) :537–542.

- 
- Kalinski, R. J. and Kelly, W. E. (1993). Estimating water content of soils from electrical resistivity. *Geotechnical Testing Journal*, 16(3) :323–329.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1) :35–45.
- Kang, H.-J., Cho, I.-K., Kim, J.-H., Yong, H.-H., Song, S.-H., and Park, Y.-G. (2014). SP monitoring at a sea dike. *Near Surface Geophysics*, 12(1) :83–92.
- Kaouane, C. (2016). *Polarisation provoquée spectrale pour la caractérisation géotechnique des sols compactés : évaluation pratique en laboratoire*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Karaoulis, M., Revil, A., Werkema, D. D., Minsley, B. J., Woodruff, W. F., and Kemna, A. (2011). Time-lapse three-dimensional inversion of complex conductivity data using an active time constrained (ATC) approach. *Geophysical Journal International*, 187(1) :237–251.
- Karaoulis, M., Revil, A., Zhang, J., and Werkema, D. D. (2012). Time-lapse joint inversion of crosswell DC resistivity and seismic data : A numerical investigation. *Geophysics*.
- Karl, L., Fechner, T., François, S., and Degrande, G. (2008). Application of surface waves for the geotechnical characterisation of dykes. In *Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Karl, L., Fechner, T., Schevenels, M., François, S., and Degrande, G. (2011). Geotechnical characterization of a river dyke by surface waves. *Near Surface Geophysics*, 9(6) :515–527.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons.
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford, pergamon press inc. edition.
- Kelly, W. E. (1977). Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. *Groundwater*, 15(6) :420–425.
- Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., Williams, K. H., Orozco, A. F., Haegel, F.-H., Hoerdt, A., and others (2012). An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*, 10(6) :453–468.
- Kenney, T. C. and Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. *Canadian geotechnical journal*, 22(2) :215–225.
- Kenyon, W. E. (1997). Petrophysical principles of applications of NMR logging. *The Log Analyst*, 38(02).

- 
- Keys, W. S. (2017). *A Practical Guide to Borehole Geophysics in Environmental Investigations*. Routledge.
- Khakural, B. R., Robert, P. C., and Hugins, D. R. (1998). Use of non-contacting electromagnetic inductive method for estimating soil moisture across a landscape. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 29(11-14) :2055–2065.
- Kim, H.-S., Chung, C.-K., and Kim, J.-J. (2018). Three-dimensional geostatistical integration of borehole and geophysical datasets in developing geological unit boundaries for geotechnical investigations. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 51(1) :79–95.
- Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., and Drummond, S. T. (1996). Mapping of sand deposition from 1993 midwest floods with electromagnetic induction measurements. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(4) :336–340.
- Klir, G. J. and Wierman, M. J. (2013). *Uncertainty-based information : elements of generalized information theory*, volume 15. Physica.
- Kneibler, C. R. (1985). *Seismic refraction surveys of alluvium-filled washes, Yucca Mountain, Nevada*. PhD thesis, University of Nevada, Reno.
- Koch, K., Revil, A., and Holliger, K. (2012). Relating the permeability of quartz sands to their grain size and spectral induced polarization characteristics. *Geophysical Journal International*, 190(1) :230–242.
- Koerner, R. M., McCabe, W. M., and Lord, A. E. (1981). Acoustic emission behavior and monitoring of soils. In *Acoustic emissions in geotechnical engineering practice*. ASTM International.
- Kolmogorov, A. N. (1933). Foundations of probability.
- Konrad, J.-M. and Law, K. T. (1987). Undrained shear strength from piezocone tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(3) :392–405.
- Kuras, O. (2002). *The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface*. PhD thesis, University of Nottingham.
- Kuras, O., Beamish, D., Meldrum, P. I., and Ogilvy, R. D. (2006). Fundamentals of the capacitive resistivity technique. *Geophysics*, 71(3) :G135–G152.
- Kuroda, S., Jang, H., and Kim, H. J. (2009). Time-lapse borehole radar monitoring of an infiltration experiment in the vadose zone. *Journal of Applied Geophysics*, 67(4) :361–366.
- Lacasse, S. and Nadim, F. (2007). Probabilistic geotechnical analyses for offshore facilities. *Georisk*, 1(1) :21–42.
- Lagabrielle, R. (2007). *Géophysique appliquée au génie civil*. Ed. Techniques Ingénieur.

- 
- Lai, W. W.-L., Derobert, X., and Annan, P. (2018). A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering : A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT & E International*, 96 :58–78.
- Lane Jr, J. W., Ivanov, J., Day-Lewis, F. D., Clemens, D., Patev, R., and Miller, R. D. (2008). Levee evaluation using MASW : Preliminary findings from the citrus lakefront levee, New Orleans, Louisiana. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2008*, pages 703–712. Society of Exploration Geophysicists.
- Larrabee, A. C. (2010). *Determination of hydraulic conductivity using the Permeator*. University of New Hampshire.
- Larsson, R. (1980). Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4) :591–602.
- Lavoue, F. (2014). 2d Full waveform inversion of ground penetrating radar data : towards multiparameter imaging from surface data. page 234.
- Le Feuvre, M., Joubert, A., Leparoux, D., and Côte, P. (2015). Passive multi-channel analysis of surface waves with cross-correlations and beamforming. Application to a sea dike. *Journal of Applied Geophysics*, 114 :36–51.
- LeCun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553) :436.
- Lefranc, E. (1936). Procédé de mesure de la perméabilité des sols dans les nappes aquifères et application au calcul du débit des puits. *Le Génie Civil*, 109(15) :306–308.
- Lefranc, E. (1937). La théorie des poches absorbantes et son application à la détermination du coefficient de perméabilité en place et au calcul du débit des nappes d'eau. *Le Génie Civil*, 111(20) :409–413.
- Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Beauce, A., and Bernard, J. (2002). Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *Journal of Applied Geophysics*, 50(1) :21–46.
- Lepetit, L. (2002). *Etude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Leroux, V., Dahlin, T., and Svensson, M. (2007). Dense resistivity and induced polarization profiling for a landfill restoration project at Härlöv, Southern Sweden. *Waste Management & Research*, 25(1) :49–60.
- Li, Y. and Oldenburg, D. W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63(1) :109–119.

- 
- Lin, C.-P., Chang, C.-C., and Chang, T.-S. (2004). The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9) :689–698.
- Lin, C.-P., Hung, Y.-C., Yu, Z.-H., and Wu, P.-L. (2013). Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography. *Journal of GeoEngineering*, 8(2) :61–70.
- Lin, C.-P. and Lin, C.-H. (2007). Effect of lateral heterogeneity on surface wave testing : Numerical simulations and a countermeasure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(6) :541–552.
- Liu, Z. and Kleiner, Y. (2013). State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. *Measurement*, 46(1) :1–15.
- Loke, M. H. (2002). RES2dmod ver. 3.01 : Rapid 2d resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods. *Software manual*.
- Loke, M. H. (2011). Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Technical report.
- Loke, M. H. and Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1. *Geophysical prospecting*, 44(1) :131–152.
- Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., and Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95 :135–156.
- Look, B. G. (2014). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. CRC Press.
- Lopes, S. P., Fargier, Y., François, D., Fauchard, C., Jacqueline, D., and Cote, P. (2012). Improving DC-Electrical Resistivity Imaging techniques for water infiltration detection and monitoring in earth hydraulic structures. Paris.
- Lunne, T., Robertson, P. K., and Powell, J. J. M. (1997). Cone penetration testing. *Geotechnical Practice*.
- Mair, R. J. and Wood, D. M. (2013). *Pressuremeter testing : methods and interpretation*. Elsevier.
- Malpica, J. A., Alonso, M. C., and Sanz, M. A. (2007). Dempster–Shafer Theory in geographic information systems : A survey. *Expert Systems with Applications*, 32(1) :47–55.
- Mao, D., Revil, A., and Hinton, J. (2016). Induced polarization response of porous media with metallic particles - Part 4 : Detection of metallic and nonmetallic targets in time-domain induced polarization tomography. *Geophysics*, 81(4) :D359–D375.

- 
- Marcak, H. and Golebiowski, T. (2014). The use of GPR attributes to map a weak zone in a river dike. *Exploration Geophysics*, 45(2) :125–133.
- Marescot, L., Rigobert, S., Lopes, S. P., Lagabrielle, R., and Chapellier, D. (2006). A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3d structures. *Journal of Applied Geophysics*, 60(1) :55–67.
- Marot, D., Regazzoni, P.-L., and Wahl, T. (2011). Energy-based method for providing soil surface erodibility rankings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12) :1290–1293.
- Martin, A. (2005). La fusion d'informations. *Polycopié de cours ENSIETA-Réf*, 1484 :117.
- Martin, A. and Osswald, C. (2006). A new generalization of the proportional conflict redistribution rule stable in terms of decision. *Advances and Applications of DSMT for Information Fusion : Collected Works Volume 2*, 2 :69–88.
- Mary, B., Saracco, G., Peyras, L., Vennetier, M., Mériaux, P., and Camerlynck, C. (2016). Mapping tree root system in dikes using induced polarization : Focus on the influence of soil water content. *Journal of Applied Geophysics*, 135 :387–396.
- Masson, M.-H. (2005). Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises. *Habilitation à diriger des Recherches soutenue le*, 2.
- Mata, J. (2011). Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models. *Engineering Structures*, 33(3) :903–910.
- McCulloch, W. S. and Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4) :115–133.
- McNeill, J. D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Report Note TN-18, Geonics Limited, Ontario, Canada.
- Menke, W. (2018). *Geophysical data analysis : Discrete inverse theory*. Academic press.
- Mériaux, P., Lino, M., and Royet, P. (2000). *Méthodologie de diagnostic des digues : appliquée aux levées de la Loire moyenne*. Editions Quae.
- Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B., and Ivanov, J. M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, 18(12) :1392–1396.
- Miquel, T., Sorin, J.-L., Maurin, J., Tourment, R., Pons, F., Bohard, J., and Biscay, J.-F. (2016). DIDRO Project-New means for surveying dikes and similar flood defense structures. In *E3S Web of Conferences*, volume 7, page 14002. EDP Sciences.

- 
- Mola-Abasi, H., Eslami, A., and Shourijeh, P. T. (2013). Shear Wave Velocity by Polynomial Neural Networks and Genetic Algorithms Based on Geotechnical Soil Properties. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(4) :829–838.
- Möller, B., Bergdahl, U., and Elmgren, K. (2004). Soil-rock sounding with MWD-a modern technique to investigate hard soils and rocks. In *International Site Characterisation Conference ISC-2. The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*. Porto, Portugal. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization Millpress, Rotterdam, Netherlands*.
- Monnet, J. (2012a). Elasto-plastic analysis of the pressuremeter test in granular soil-part 1 : theory. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(6) :699–714.
- Monnet, J. (2012b). Elasto-plastic analysis of the pressuremeter test in granular soil-part 2 : numerical study. *European journal of environmental and civil engineering*, 16(6) :715–729.
- Monnet, J. and Khlif, J. (1994). Etude théorique de l'équilibre élastoplastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre. *Revue Française de géotechnique*, 67 :3–12.
- Moon, W. M. (1990). Integration of geophysical and geological data using evidential belief function. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4) :711–720.
- Morgan, M. G. and Keith, D. W. (1995). Subjective judgments by climate experts. *Environmental Science & Technology*, 29(10) :468A–476A.
- Morris, M. (2012). D3. 1 Guidance on improved performance of urban flood defences. Technical report, Technical report, Flood-ProBE, 2012.
- Morris, P. H. and Williams, D. J. (1994). Effective stress vane shear strength correction factor correlations. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3) :335–342.
- Nabighian, M. N. (1991). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics : Volume 2, Application, Parts A and B*. Society of Exploration Geophysicists.
- Nagy, L. (2012). Statistical evaluation of historical dike failure mechanism. *Riscursi si Catastrofe*, 11(2) :7–20.
- Nasberg, V. M. (1951). The problem of flow in an unsaturated soil for injection under pressure. *Izvestja Akademia Nauk, SSSR Odt Tekh Nauk*, (9).
- Niederleithinger, E., Weller, A., and Lewis, R. (2012). Evaluation of geophysical techniques for dike inspection. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 17(4) :185–195.
- Nolan, J. J., Sloan, S. D., Broadfoot, S. W., McKenna, J. R., and Metheny, O. M. (2011). Near-surface void identification using MASW and refraction tomography techniques. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*, pages 1401–1405. Society of Exploration Geophysicists.

- 
- Nowell, D. A. G. (1999). Gravity terrain corrections-an overview. *Journal of Applied Geophysics*, 42(2) :117–134.
- Ohsaki, Y. (1962). Geotechnical properties of Tokyo subsoils. *Soils and Foundations*, 2(2) :17–34.
- Paasche, H. and Tronicke, J. (2007). Cooperative inversion of 2d geophysical data sets : A zonal approach based on fuzzy c-means cluster analysis. *Geophysics*, 72(3) :A35–A39.
- Palacky, G. J. (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1 :53–129.
- Palmer, D. (1980). *The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation*. Society of Exploration Geophysicists.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3) :800–808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., and Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)-active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1) :60–64.
- Parker Jr, E. H. and Hawman, R. B. (2012). Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) in karst terrain, southwest Georgia : Implications for detecting anomalous features and fracture zones. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 17(3) :129–150.
- Peters, B., Haber, E., and Granek, J. (2019). Neural-networks for geophysicists and their application to seismic data interpretation. *arXiv preprint arXiv :1903.11215*.
- Pettinelli, E., Di Matteo, A., Mattei, E., Crocco, L., Soldovieri, F., Redman, J. D., and Annan, A. P. (2009). GPR response from buried pipes : Measurement on field site and tomographic reconstructions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8) :2639–2645.
- Peyras, L., Carvajal, C., Arnaud, P., Royet, P., and Boissier, D. (2009). Modélisation probabiliste de la cote de remplissage d’un barrage. In *Colloque CFBR-SHF :« Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues*, pages 20–21.
- Pfister, P. (1985). Recording drilling parameters in ground engineering. *Journal of Ground Engineering*, 18(3) :16–21.
- Pflug, K., Killeen, P., and Mwenifumbo, C. (1997). Borehole Geophysics in Gold Exploration. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1997*, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pages 953–962. Environment and Engineering Geophysical Society.
- Phoon, K.-K. and Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian geotechnical journal*, 36(4) :612–624.

- 
- Pidlisecky, A., Haber, E., and Knight, R. (2007). RESINVM3d : A 3d resistivity inversion package. *GEOPHYSICS*, 72(2) :H1–H10.
- Poulain, D., Chasse, P., Deniaud, Y., Goutaland, D., Kahan, J.-M., Lebreton, P., Ledoux, P., Rouxel, N., Salmon, D., and Tourment, R. (2015). Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Technical report.
- Rahmati, O. and Melesse, A. M. (2016). Application of Dempster–Shafer theory, spatial analysis and remote sensing for groundwater potentiality and nitrate pollution analysis in the semi-arid region of Khuzestan, Iran. *Science of the Total Environment*, 568 :1110–1123.
- Rangeard, D., Y Hicher, P., and Zentar, R. (2003). Determining soil permeability from pressuremeter tests. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(1) :1–24.
- Rawls, W. J. and Brakensiek, D. L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In *Unsaturated flow in hydrologic modeling*, pages 275–300. Springer.
- Rücker, C. and Günther, T. (2011). The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model. *Geophysics*, 76(4) :F227–F238.
- Reiffsteck, P. (2010). Utilisation des paramètres de forage en reconnaissance géotechnique. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*, pages 157–164.
- Reiffsteck, P., Dorbani, B., Khay, M., and Haza-Rozier, E. (2009). Appareillage pour diagraphie de perméabilité. In *17eme congrès international de mécanique des sols et de géotechnique*, page sp.
- Reiffsteck, P., Lossy, D., and Benoît, J. (2012). *Forages, Sondages et Essais In Situ Géotechniques-les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*. Presse des Ponts.
- Rémai, Z. (2013). Correlation of undrained shear strength and CPT resistance. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 57(1) :39.
- Revil, A., Ehouarne, L., and Thyreault, E. (2001). Tomography of self-potential anomalies of electrochemical nature. *Geophysical Research Letters*, 28(23) :4363–4366.
- Revil, A. and Florsch, N. (2010). Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3) :1480–1498.
- Rhudy, M. B. (2015). Increasing the convergence rate of the Extended Kalman Filter. In *AIAA Infotech@ Aerospace*, page 0187.
- Richards, K. S. and Reddy, K. R. (2012). Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils. *Géotechnique*, 62(10) :933.

- Riechers, J. (2012). Impact of Drilling in Embankment Dams : A Comparative study between Water Powered DTH Hammer Drilling Technology and Hydraulic Top Hammer Drills.
- Rinaldi, M., Casagli, N., Dapporto, S., and Gargini, A. (2004). Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(2) :237–254.
- Rittgers, J. B., Revil, A., Planes, T., Mooney, M. A., and Koelewijn, A. R. (2014). 4-D imaging of seepage in earthen embankments with time-lapse inversion of self-potential data constrained by acoustic emissions localization. *Geophysical Journal International*, 200(2) :758–772.
- Robain, H., Descloitres, M., Ritz, M., and Atangana, Q. Y. (1996). A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of applied Geophysics*, 34(4) :237–253.
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1) :151–158.
- Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT : an update. In *2nd international symposium on cone penetration testing, USA*, pages 9–11.
- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system-an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12) :1910–1927.
- Robertson, P. K. and Cabal, K. L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. In *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, pages 2–40.
- Robertson, P. K. and Cabal, K. L. (2015). *Guide to cone penetration testing 6th Edition*. Gregg Drilling & Testing, Inc. 6th Edition, Signal Hill, California.
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological review*, 65(6) :386.
- Roy, M. and Leblanc, A. (1988). Factors affecting the measurements and interpretation of the vane strength in soft sensitive clays. In *Vane Shear Strength Testing in Soils : Field and Laboratory Studies*. ASTM International.
- Royet, P., Palma Lopes, S., Fauchard, C., Mériaux, P., and Auriou, L. (2013). Rapid and cost-effective dike condition assessment methods : geophysics and remote sensing. *FloodProBE Project*.
- Rozycki, A., Fonticiella, J. R., and Cuadra, A. (2006). Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method. *Engineering Geology*, 82(3) :145–153.
- Rücker, C., Günther, T., and Spitzer, K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - I. Modelling. *Geophysical Journal International*, 166(2) :495–505.

- 
- Rymarczyk, T., Klosowski, G., and Gola, A. (2018). The use of artificial neural networks in tomographic reconstruction of soil embankments. In *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence*, pages 104–112. Springer.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., and Bruand, A. (2003). Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5) :1319–1326.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., and Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science : a review. *Soil and Tillage research*, 83(2) :173–193.
- Sarma, V. S. (2014). Electrical Resistivity (ER), Self Potential (SP), Induced Polarisation (IP), Spectral Induced Polarisation (SIP) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) prospecting in NGRI for the past 50 years-A Brief Review. *J. Ind. Geophys. Union*, 18(2) :245–272.
- Saunders, J. H., Herwanger, J. V., Pain, C. C., Worthington, M. H., and De Oliveira, C. R. E. (2005). Constrained resistivity inversion using seismic data. *Geophysical Journal International*, 160(3) :785–796.
- Sauvin, S., Lecomte, I., Bazin, S., Lheureux, J.-S., Vanneste, M., Solberg, I.-L., and Dalsegg, E. (2013). Towards geophysical and geotechnical integration for quick-clay mapping in Norway. *Near Surface Geophysics*, 11(6) :613–623.
- Schmutz, M., Ghorbani, A., Vaudelet, P., and Revil, A. (2011). Spectral induced polarization detects cracks and distinguishes between open-and clay-filled fractures. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 16(2) :85–91.
- Scholte, J. W., Shang, J. Q., and Rowe, R. K. (2002). Improved complex permittivity measurement and data processing technique for soil-water systems. *Geotechnical Testing Journal*, 25(2) :187–198.
- Schwartz, B. F., Schreiber, M. E., and Yan, T. (2008). Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 362(3) :234–246.
- Seghir, A., Benamar, A., and Wang, H. (2014). Effects of fine particles on the suffusion of cohesionless soils. Experiments and modeling. *Transport in Porous Media*, 103(2) :233–247.
- Sellmeijer, H., de la Cruz, J. L., van Beek, V. M., and Knoeff, H. (2011). Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(8) :1139–1154.
- Sentenac, P., Benes, V., Budinsky, V., Keenan, H., and Baron, R. (2017). Post flooding damage assessment of earth dams and historical reservoirs using non-invasive geophysical techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 146 :138–148.

- 
- Shaaban, F., Ismail, A., Massoud, U., Mesbah, H., Lethy, A., and Abbas, A. M. (2013). Geotechnical assessment of ground conditions around a tilted building in Cairo–Egypt using geophysical approaches. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 13(1) :63–72.
- Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*, volume 42. Princeton university press.
- Shan, C., Bastani, M., Malehmir, A., Persson, L., and Engdahl, M. (2014). Integrated 2d modeling and interpretation of geophysical and geotechnical data to delineate quick clays at a landslide site in southwest Sweden. *Geophysics*, 79(4) :EN61–EN75.
- Sharp, M., Wallis, M., Deniaud, F., Hersch-Burdick, R., Tourment, R., Matheu, E., Seda-Sanabria, Y., Wersching, S., Veylon, G., Durand, E., and others (2013). The international levee handbook. *CIRIA, London*.
- Sheehan, J. R., Doll, W. E., and Mandell, W. A. (2005a). An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10(1) :21–34.
- Sheehan, J. R., Doll, W. E., Watson, D. B., and Mandell, W. A. (2005b). Application of seismic refraction tomography to karst cavities. *US Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Rapid City, South Dakota*, pages 29–38.
- Sherlock, M. D. and McDonnell, J. J. (2003). A new tool for hillslope hydrologists : spatially distributed groundwater level and soilwater content measured using electromagnetic induction. *Hydrological Processes*, 17(10) :1965–1977.
- Sibille, L., Marot, D., and Sail, Y. (2015). A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter. *Acta Geotechnica*, 10(6) :735–748.
- Silva, F., Lambe, T. W., and Marr, W. A. (2008). Probability and risk of slope failure. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(12) :1691–1699.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., and Johansson, S. (2005). Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. *Environmental geology*, 49(2) :267–273.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., Johansson, S., and Loke, M. H. (2008). Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4) :155–164.
- Slater, L. D. and Lesmes, D. (2002). IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics*, 67(1) :77–88.
- Smarandache, F. and Dezert, J. (2013). On the consistency of PCR6 with the averaging rule and its application to probability estimation. In *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, pages 1119–1126. IEEE.

- 
- Smets, P. (1990). The combination of evidence in the transferable belief model. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 12(5) :447–458.
- Smets, P. (1991). Varieties of ignorance and the need for well-founded theories. *Information Sciences*, 57(58) :135–144.
- Smets, P. (1993). Belief functions : the disjunctive rule of combination and the generalized Bayesian theorem. *International Journal of approximate reasoning*, 9(1) :1–35.
- Smets, P. (1997a). Imperfect information : Imprecision and uncertainty. In *Uncertainty management in information systems*, pages 225–254. Springer.
- Smets, P. (1997b). The normative representation of quantified beliefs by belief functions. *Artificial Intelligence*, 92(1-2) :229–242.
- Smith, D. G. and Jol, H. M. (1995). Ground penetrating radar : antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1-3) :93–100.
- Socco, L. V., Foti, S., and Boiero, D. (2010). Surface-wave analysis for building near-surface velocity models-Established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75(5) :75A83–75A102.
- Solberg, I.-L., Hansen, L., Rønning, J. S., Haugen, E. D., Dalsegg, E., and Tønnesen, J. F. (2012). Combined geophysical and geotechnical approach to ground investigations and hazard zonation of a quick clay area, mid Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(1) :119–133.
- Song, S.-H., Song, Y., and Kwon, B.-D. (2005). Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam. *Exploration Geophysics*, 36(1) :92–96.
- Stewart, R. A. (2000). Dam risk management. In *ISRM international symposium*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Strobbia, C. and Foti, S. (2006). Multi-offset phase analysis of surface wave data (MOPA). *Journal of Applied Geophysics*, 59(4) :300–313.
- Styles, P., McGrath, R., Thomas, E., and Cassidy, N. J. (2005). The use of microgravity for cavity characterization in karstic terrains. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(2) :155–169.
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., and Rai, J. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1) :74–79.
- Sulewska, M. J. (2017). Applying artificial neural networks for analysis of geotechnical problems. page 11.

- 
- Sumner, J. S. (2012). *Principles of induced polarization for geophysical exploration*, volume 5. Elsevier.
- Tabbagh, A. and Verron, G. (1983). Etude par prospection électromagnétique de trois sites à dépôts de l'Âge du Bronze. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 80(10/12) :375–389.
- Tabbagh, J., Samouëlian, A., Tabbagh, A., and Cousin, I. (2007). Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterisation of cracks in soils. *Journal of Applied Geophysics*, 62(4) :313–323.
- Tacnet, J.-M. (2009). *Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information*. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Talon, A., Curt, C., and Boissier, D. (2012). Performance assessment based on evidence theory and fuzzy logic : Application to building and dam performance. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1) :124–133.
- Tanajewski, D. and Bakula, M. (2016). Application of Ground Penetrating Radar Surveys and GPS Surveys for Monitoring the Condition of Levees and Dykes. *Acta Geophysica*, 64(4) :1093–1111.
- Tangestani, M. H. (2009). A comparative study of Dempster–Shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS : An experience from Zagros Mountains, SW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(1) :66–73.
- Tangestani, M. H. and Moore, F. (2002). The use of Dempster–Shafer model and GIS in integration of geoscientific data for porphyry copper potential mapping, north of Shahr-e-Babak, Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1) :65–74.
- Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*, volume 89. siam.
- Tezkan, B. (1999). A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques. *Surveys in Geophysics*, 20(3) :279–308.
- Thevanayagam, S., Chameau, L. L., and Altschaeffl, A. G. (1994). Some aspects of pressuremeter test interpretation in clays. *Geotechnique*, 44(2) :319–334.
- Thiesson, J., Dabas, M., and Flageul, S. (2009). Detection of resistive features using towed Slingram electromagnetic induction instruments. *Archaeological Prospection*, 16(2) :103–109.
- Thiesson, J., Tabbagh, A., Simon, F.-X., and Dabas, M. (2017). 3d linear inversion of magnetic susceptibility data acquired by frequency domain EMI. *Journal of Applied Geophysics*, 136 :165–177.

- 
- Titov, K., Tarasov, A., Ilyin, Y., Seleznev, N., and Boyd, A. (2010). Relationships between induced polarization relaxation time and hydraulic properties of sandstone. *Geophysical Journal International*, 180(3) :1095–1106.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, 16(3) :574–582.
- Torge, W. (1979). Gravimetry. *Geodetic Activities Performed During the Period 1975-1978*.
- Touzet, C. (1992). *les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme*. EC2.
- Tran, L. and Duckstein, L. (2002). Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure. *Fuzzy sets and Systems*, 130(3) :331–341.
- Tsourlos, P. I. and Ogilvy, R. D. (1999). An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarisation data : preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2(2) :30–45.
- Tuckwell, G., Grossey, T., Owen, S., and Stearns, P. (2008). The use of microgravity to detect small distributed voids and low-density ground. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41(3) :371–380.
- Turesson, A. (2006). Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, 58(2) :99–111.
- Ursat, P. (1992). Le Perméafor. Appareillage de diagraphie de perméabilité. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, (178) :19–26.
- Van Baars, S. and Van De Graaf, H. C. (2007). Determination of organic soil permeability using the piezocone dissipation test. *Environmental & Engineering Geoscience*, 13(3) :197–203.
- van Beek, V. M., Knoeff, H., and Sellmeijer, H. (2011). Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium-and full-scale experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(8) :1115–1137.
- Van Der Meij, R., Tourment, R., Maurel, P., and Morris, M. (2012). Combining information for urban levee assessment'. *FloodProBE Report Number : WP03-01-12-24*.
- van der Veen, A., Steenge, A. E., Bockarjova, M., and Logtmeijer, C. J. (2003). Structural economic effects of large scale inundation : a simulation of the Krimpen dike breakage. *DC1-233.12*.
- Van Ree, C., Van, M. A., Heilemann, K., Morris, M. W., Royet, P., and Zevenbergen, C. (2011). FloodProBE : technologies for improved safety of the built environment in relation to flood events. *Environmental science & policy*, 14(7) :874–883.

- 
- van Schoor, M., Mare, L. P., and Fourie, C. J. S. (2009). Comparison between time- and frequency-domain induced polarisation parameters. In *11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition*.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176 :11–33.
- Vaudelet, P., Schmutz, M., Pessel, M., Franceschi, M., Guerin, R., Atteia, O., Blondel, A., Ngomseu, C., Galaup, S., Réjiba, F., and others (2011). Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. A case study in urban context. *Journal of Applied Geophysics*, 75(4) :738–751.
- Vaz, C. M., Bassoi, L. H., and Hopmans, J. W. (2001). Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil and Tillage Research*, 60(1) :35–42.
- Verdet, C., Anguy, Y., Sirieix, C., Clément, R., and Gaborieau, C. (2018). On the effect of electrode finiteness in small-scale electrical resistivity imaging. *Geophysics*, 83(6) :EN39–EN52.
- Vichabian, Y. and Morgan, F. D. (2002). Self potentials in cave detection. *The Leading Edge*, 21(9) :866–871.
- Vickery, A. C. and Hobbs, B. A. (2002). The effect of subsurface pipes on apparent-resistivity measurements. *Geophysical Prospecting*, 50(1) :1–13.
- Vogelsang, D. (1987). Examples of electromagnetic prospecting for karst and fault systems. *Geophysical Prospecting*, 35(5) :604–617.
- Vuillet, M. (2012). *Élaboration d'un modèle d'aide à la décision probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales*. PhD Thesis, Paris Est.
- Waldeland, A. U., Jensen, A. C., Gelius, L.-J., and Solberg, A. H. S. (2018). Convolutional neural networks for automated seismic interpretation. *The Leading Edge*, 37(7) :529–537.
- Wan, C. F. and Fell, R. (2002). *Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the soil slot erosion test and the hole erosion test*. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering.
- Wan, C. F. and Fell, R. (2004a). Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(4) :373–380.
- Wan, C. F. and Fell, R. (2004b). Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams.
- Ward, S. H. (1990). *Geotechnical and environmental geophysics*, volume 1 of *Investigations in geophysics series*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla. OCLC : ocm71006842.

- 
- Wasserman, L. (2013). *All of statistics : a concise course in statistical inference*. Springer Science & Business Media.
- Watson, F. (2016). Towards 3d full-wave inversion for GPR. In *2016 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, pages 1–6, Philadelphia, PA, USA. IEEE.
- Waxman, M. H., Smits, L. J. M., and others (1968). Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(02) :107–122.
- Weichman, P. B., Lavelly, E. M., and Ritzwoller, M. H. (2000). Theory of surface nuclear magnetic resonance with applications to geophysical imaging problems. *Physical Review E*, 62(1) :1290.
- Weller, A., Canh, T., Breede, K., and Vu, N. T. (2006). Multi-electrode measurements at Thai Binh dikes (Vietnam). *Near Surface Geophysics*, 4(2) :135–143.
- Weller, A., Slater, L., Nordsiek, S., and Ntarlagiannis, D. (2010). On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization : A robust empirical relation fits multiple data sets. *Geophysics*, 75(4) :WA105–WA112.
- West, L. J., Handley, K., Huang, Y., and Pokar, M. (2003). Radar frequency dielectric dispersion in sandstone : Implications for determination of moisture and clay content. *Water Resources Research*, 39(2).
- White, D. J. (1989). Two-Dimensional Seismic Refraction Tomography. *Geophysical Journal International*, 97(2) :223–245.
- Xia, J. (2014). Estimation of near-surface shear-wave velocities and quality factors using multichannel analysis of surface-wave methods. *Journal of applied geophysics*, 103 :140–151.
- Xia, J., Miller, R. D., and Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3) :691–700.
- Xu, X., Zeng, Q., Li, D., Wu, J., Wu, X., and Shen, J. (2010). GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams. *Engineering Geology*, 111(1) :31–42.
- Yaramanci, U., Lange, G., and Knödel, K. (1999). Surface NMR within a geophysical study of an aquifer at Haldensleben (Germany). *Geophysical prospecting*, 47(6) :923–943.
- Yu, C., Ji, S., and Li, Q. (2016). Effects of porosity on seismic velocities, elastic moduli and Poisson’s ratios of solid materials and rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(1) :35–49.
- Yule, D. E., Sharp, M. K., and Butler, D. K. (1998). Microgravity investigations of foundation conditions. *Geophysics*, 63(1) :95–103.
- Zadeh, L. (1979). On the validity of Dempster’s rule of combination, Memo M 79/24. *Univ. of California, Berkeley*, 74.

- 
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3) :338–353.
- Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1(1) :3–28.
- Zadeh, L. A. (1984). Review of a mathematical theory of evidence. *AI magazine*, 5(3) :81–81.
- Zanetti, C., Weller, A., Vennetier, M., and Mériaux, P. (2011). Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements : a laboratory experiment. *Plant and soil*, 339(1-2) :273–283.
- Zawadzki, L. and Bajda, M. (2016). Impact of the moisture content in medium sands on CPTU test results. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 48(3) :221–231.
- Zelt, C. A. and Barton, P. J. (1998). Three-dimensional seismic refraction tomography : A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 103(B4) :7187–7210.
- Zentar, R. (1999). *Analyse inverse des essais pressiométriques, application à l'argile de Saint-Herblain*. PhD thesis.
- Zhao, T. (2018). Seismic facies classification using different deep convolutional neural networks. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018*, pages 2046–2050. Society of Exploration Geophysicists.
- Zhu, W., Mousavi, S. M., and Beroza, G. C. (2018). Seismic signal denoising and decomposition using deep neural networks. *arXiv preprint arXiv :1811.02695*.
- Zimmermann, H. J. (1991). Fuzzy sets and its applications. *Massachusetts : Kluwer Academic Publishers*.
- Zohdy, A. A., Eaton, G. P., and Mabey, D. R. (1974). Application of surface geophysics to ground-water investigations. *US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 2(chap. D1).

**Titre :** Combinaison d'informations ponctuelles et volumiques pour le diagnostic d'ouvrages en terre soumis à des risques hydrauliques

**Mots clés :** géophysique, géotechnique, fusion d'informations, digues de protection

**Résumé :** En France, les digues de protection fluviales s'étendent sur plus de 8 600 km. Ces ouvrages sont très hétérogènes, de par leur mode de construction et leur historique (ruptures et réparations, rehausses...). Les ruptures d'ouvrage sont susceptibles de mener à des conséquences désastreuses telles que des pertes humaines et économiques. Afin de prévenir les risques de rupture, une bonne gestion des digues de protection est requise. Elle inclut un diagnostic débutant par une reconnaissance visuelle de l'objet d'étude et par des recherches historiques et bibliographiques. Des méthodologies reconnues pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques s'appuyant sur des méthodes complémentaires de reconnaissance géotechniques et géophysiques sont aussi employées.

Ce travail présente une méthodologie de combinaisons d'informations, issues de ces deux familles de méthodes de reconnaissance, tenant compte des particularités de chaque méthode (niveau d'imperfection associé aux données, répartition spatiale de l'information). Cette nouvelle méthodologie considère le cadre fixé par la théorie des masses de croyance et améliore la caractérisation des ensembles lithologiques au sein des digues en renseignant sur le niveau de conflit entre les sources d'information tout en proposant un indice de confiance associé aux résultats. La méthodologie est mise en œuvre à travers des exemples de sections de sous-sols caractérisées à travers de données synthétiques et expérimentales ainsi qu'issues d'un véritable ouvrage hydraulique en terre.

**Title :** Combination of intermittent and spatialized information for the diagnosis of earthworks subject to hydraulic hazards

**Keywords :** geophysics, geotechnics, information fusion, protection levees

**Abstract :** In France, the river protection levees extend over more than 8,600 km. These structures are very heterogeneous, due to their construction and their history (breaks and repairs, extensions ...). Breaks of work are likely to lead to disastrous consequences such as loss of lives, economic and environmental disasters. In order to prevent the risk of breakage, special supervision of the protection levees is required. This surveillance begins with a visual recognition of the object of study as well as historical and bibliographic research. Recognized methodologies for the assessment of hydraulic structures including complementary geotechnical and geophysical reconnaissance methods are also being used.

This work presents a new way of combining data from these two types of information sources, taking into account the specificities of each kind of method (level of imperfection associated with the data, spatial distribution of the information). This new methodology considers the framework fixed by the theory of belief masses and improves the characterization of lithological sets within levees by providing information on the level of conflict between information sources while proposing a confidence index associated with the results. The methodology is implemented through examples of subsoil sections characterized by synthetic and experimental data as well as by data from a real earthen levee.